



<https://doi.org/10.52215/rev.bgs.2020.81.1.3>

Структурно-геоложки методи в геотехническата практика – скално рейтингиране. Предимства и проблеми на рейтинговите методи

Иван Димитров

Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, ул. „Проф. Боян Каменов“ № 1, 1700 София

Structural geological methods in the geotechnical practice – rock mass rating. Advantages and problems of the rating methods

Ivan Dimitrov

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1 Prof. Boyan Kamenov str., 1700 Sofia, Bulgaria; E-mail: idim68@abv.bg

Abstract. This paper presents a review of the most common geotechnical rock rating methods. The directional properties of the rock's anisotropies are exemplified, by a case of resolution of stresses in folded and foliated metamorphic rocks. In such rocks, depending on the geometry of the folds, the ambient stress field can generate varying shear potential along the foliation planes in different parts of the excavation. The commonly used rating schemes, with accent on the geological feasibility of the classifications, are discussed – Protodiakonov's rock scale, Terzaghi's grading for construction of tunnels, then the rock quality designation of Deere, the Bieniawski's rock mass rating (RMR), the Hoek, and Brown's GSI and the Barton's Q-system. It is emphasized that in spite of its broad use, the RQD is distorting the statistical weight of the joint groups as some steeply dipping joints may be completely neglected. It is recognized that the RMR is the simplest to use but underestimates the directional properties of the rock anisotropies, which require better definition and has no provision for lithologically varying rock packages, although it has the advantage of using the uniaxial compressive strength, which other systems do not employ. The Hoek and Brown's criterion went too far with complex empirical relationships, which rely on extensive laboratory testing, so it is no more field criterion. Besides, its geological descriptive powers are rather poor and now, new form of GSI classification is offered for nearly every lithological type. Barton's Q-system, being best suited to case studies of actual underground constructions, suffers from the fact that is centered nearly exclusively on joints, which may be justified in Norway, where mainly magmatic and high grade metamorphic rocks are present but should be applied cautiously in areas, where sedimentary, volcanic and strongly foliated rocks are exposed. In general, for all the discussed geomechanical classification systems (RMR, GSI, Q) the rule is valid, that they work better in an isotropic, strong but jointed rock masses and do not work well in weak layered and foliated rocks.

Keywords: geotechnical rock mass rating, joints, RQD, RMR, GSI, Q-system.

Резюме. Публикацията представя обзор на най-често използваните методи за геотехническо рейтингиране на скалния масив. Пространствените свойства на скалните анизотропии са илюстрирани чрез пример на разлагане на напрежения в нагнати и нащипени метаморфни скали. В такива скали, в зависимост от геометрията на гънките, естественото поле на напреженията може да генерира различна склонност към срязване в различни части на подземната изработка. Дискутирани са често използваните рейтингови схеми с акцент върху тяхната геоложка приложимост – скалите на Протодяконов и Терцаги, RQD-метод за оценка на качеството на сондажната ядка, рейтинговата схема на Биенявски (RMR), геоложкият индекс за якост (GSI) и Q-системата на Бартон. Отбелязва се, че въпреки своята широка употреба, RQD изкривява статистическата значимост на пукнатините, а RMR е най-простата и лесна за употреба, но оценява пространствената ориентация на скалните прекъснатости. Критерият на Хоук и Браун разчита твърде много на сложни емпирични връзки и на обширни лабораторни изследвания, така че не може да се нарича критерий за теренна оценка. Освен това неговата геоложка описателна сила е по-скоро незадоволителна. Q-системата на Бартон, която е най-силно обвързана с реални случаи на тунелно строителство, може да е добре обоснована за територията на Норвегия, която е изградена от твърди кристалини скали, но трябва да бъде прилагана внимателно в терени, изградени от слоести седиментни, вулкански или фолиирани скали. Отбелязва се, че като цяло всички дискутирани рейтингови схеми (RMR, GSI, Q) работят по-добре в изотропни, здрави, но напукани скали и дават неустойчиви резултати в слаби, наслоени или фолиирани скали.

Ключови думи: геотехническа класификация на скалите, пукнатини, RQD, RMR, GSI, Q-система.

Увод

Актуалността на настоящия текст се определя от засиленото строителство на мащабни и скъпо струващи инфраструктурни обекти, които изискват задълбочени инженерно-геоложки изследвания, при които се правят експертни оценки,

невинаги подплатени с достатъчно добро познание на разработени в чужбина методики. В този смисъл целта на статията е да помогне на инженер-геолозите и проектантите да подбират по-добре информацията, с която работят и да вземат по-обосновани технически решения. С други думи, текстът цели да запълни частично липсата

на учебно-методическа литература на български език, езиковата бариера и пропуските в университетските програми по една конкретна тема, а именно теренното описание на скалния масив при строителството на важни съоръжения.

Основната идея на скалното рейтингиране се състои в това, че лабораторните данни, поради своето малко количество и слабата представителност на отделните проби, не характеризират скалния масив като цяло, а само малки и непредставителни части от него. Стабилността на съоръженията обаче зависи от масива като цяло, а не съществува възможност да бъде взета и изпитана достатъчно голяма проба, която да характеризира целия масив. По тази причина се търсят начини чрез геоложко картиране да се опишат достатъчно голям брой характерни свойства, които да се групират по такъв начин, че да се изведат усреднени характеристики за целия масив.

На български език съществуват текстове, третиращи рейтингирането на масива (напр. Mitev, 2019), като целта им е да представят най-общо съществуващите рейтингови схеми в контекста на изчислителни модели за оразмеряване на укрепването на съоръженията, базирани на такива схеми (напр. Babunska-Ivanova, 2017; Mitev, 2018). В българската литература се предлага доразвиване и обогатяване на съществуващи общоприети концепции (Lakov, Stoynev, 2013; Lakov, 2018). Липсват текстове, разглеждащи критично геоложките основи на тези методики. Рейтингиране се изисква рутинно при изготвянето на инженерно-геоложки доклади или при оценката на стабилността на масива в областта на минни съоръжения (напр. Ivanov, 2006). Целта на тази работа е да покаже геоложките ситуации, в които тези схеми не работят добре или се злоупотребява с тях, принципните им слабости и като цяло проблемите, свързани с прилагането им. Затова в текста са дискутирани най-вече слабите места на тези схеми по линията на разсъждение на авторите им и на тези, които ги прилагат.

У нас елементи от скалното рейтингиране се преподават в Минно-геоложкия университет „Св. Иван Рилски“ и в Университета по архитектура, строителство и геодезия (Плов, 2004), но се преподават и на специалности с проектантска насоченост, които не изучават структурна геология, а тези схеми, както съвсем ясно обяснява Goodman (1976), са структурно-геоложки в същността си и затова за правилното им разбиране са необходими структурно-геоложки познания. По мнението на автора, освен по структурна геология, са нужни и познания по инженерна петрология, която също не се изучава самостоятелно в България.

Същност на рейтингирането

Противно на очакванията на неспециалистите, цялата човешка дейност се ръководи от натрупан опит. В този смисъл, някой може да проектира крепеж на тунел или магистрален откос, не защото е способен да прави сложни изчисления, а защото някой друг преди него е проектирал такива съоръжения и на база на пробата и грешката са се оформили границите на възможното и невъзможното. Математизацията само помага да се прецизират тези граници. Това е парадокс, за който са писали много големи учени. При строителството на големи съоръжения целта винаги е била да се систематизира натрупаният опит, като се изведат случаите, при които са възможни различни решения.

Рейтингирането не е нищо друго, освен разглеждане на голям брой стари случаи (case studies) (при RMR над 250, при Q-системата над 1000) на строителство на съоръжения с (1) известни схема на укрепване и (2) в определена геоложка среда. Тези случаи са групирани според особеностите на геоложката среда, като за всеки от тях е установено дали определени инженерни решения са били успешно използвани или не. Зависимостта между геоложките особености и успеха или неуспеха на приетите инженерни мерки ражда препоръки за инженерни решения при бъдещо строителство в подобна геоложка среда. Оттук произтича най-голямото предимство на рейтинговите схеми – те могат да се използват за избор на инженерни решения и съответно чрез тях да се формира цена за изпълнението на една или друга задача.

Същността на рейтинговата схема е двойка. От една страна стоят геоложките особености на терена, а от друга – възможните инженерни решения за преодоляването им. Геологията е свързана задължително с инженерното дело. Тук обаче се намесва човешката природа. Проектантите и геолозите трябва да си взаимодействат тясно за избиране на решението, но понякога не го правят. Липсата на взаимодействие се случва или поради некомпетентност (проектантите подценяват геологията или геолозите не разбират нуждите на проектантите) или поради някакви корисни причини за някой по веригата геолог–проектант–инвеститор–политик. Тъй като проектантите се нуждаят от числа, геоложките наблюдения и измервания се представят в числов вид, след което числата за различните аспекти на геоложката среда се комбинират в крайна сума от свойства. Обикновено тези числа се представят в табличен вид, където се трансфор-

мират в прилагателно. Например, Q-стойности-те от 1 до 4 представят „лоша“ скална среда по отношение на стабилността на тунели. Сумата от критериите на RMR, определя „много лоша“, „лоша“, „задоволителна“, „добра“ и „много добра“ скала.

Първоначално всички схеми за рейтингиране се разработват с конкретна цел. След като схемата добие известност и е приета от значителен брой специалисти, някой прави опит да разшири приложението ѝ. Появяват се все нови и нови публикации от различни автори, като първоначалната идея се забравя или преиначава. Например, някои от докладваните в литературни източници проблеми, свързани с „новия австрийски тунелен метод“, вероятно се дължат на опита да се приспособи този метод за оценка към нови методи на машинно пробиване и крепене, които се различават от „старите“ условия, за които това рейтингиране е било разработено.

През последните 10–15 години се появиха много нови публикации, свързани с Q-системата на Barton et al. (1974), целящи разширяване на нейното приложение. За геоложкия индекс на якост на Hoek & Brown сигурно има стотици публикации, излезли след първоначалната поява през 1980 г. на техния нелинеен критерий за якост. Това означава, че за ефективно прилагане на тези класификационни модели ползвателите трябва да знаят първоначалните условия, при които те са разработени и съответно техните ограничения. Следователно, трябва да се отчете всичко, което е писано по въпроса. Тогава ползвателят може да стигне до извода, че една или друга класификационна схема не е универсалното решение, което той се надява да намери, а може да се окаже пътека към професионални и финансови неблагоприятности.

Представа за скална прекъснатост

Скални прекъснатости са повърхностите, в които става смяна на свойствата на скалите (пластови граници, пукнатини, разломи, зони на срязване, повърхностите на метаморфните фолиации – гнайсовост, шистозност или кливаж, границите на обособени скални тела или на скални разновидности в магмените тела, областите на вътрешна нееднородност в скалите – шлири, ксенолити и др.). Те променят повече или по-малко реакцията на скалите на опън, натиск, срязване, термично или химично въздействие и затова изучаването на якостните свойства на скалния масив е съсредоточено именно върху тях. Известно е, че веригата е толкова здрава, колкото е

здрава най-слабата ѝ връзка. В тази смисъл, скалата или скалният масив е толкова здрав, колкото са здрави нееднородностите и повърхностите на структурна слабост в него. Смята се, че пукнатините отслабват скалния масив в най-голяма степен, но те далеч не са всички прекъснатости, които трябва да се вземат под внимание.

Скалните прекъснатости създават пространствена нееднородност не само чрез величината на механичните си свойства, напр. кохезия, ъгъл на вътрешно триене и др., но и чрез своята ориентация т.е. посока и наклон. Това може да се илюстрира като разглеждаме влиянието върху якостта на масива на метаморфна фолиация, характерна за високометаморфните терени в България. Търсим срязващото напрежение върху фолиационните плоскости около плитък тунел с нормално гравитационно напрегнато поле и с примерна ориентация и величина на главните напрежения съответно: $\sigma_1 - 45/89$, 5 МПа; $\sigma_2 - 270/1$, 2 МПа; $\sigma_3 - 0/1$, 2 МПа. При такова напрегнато поле върху фолиационна плоскост на гнайсошисти с посока 135° , наклон 45° и потъване на СИ изчисленото по аналитичния метод на Bott (1959), изложен на български език от Ivanov (2018), срязващото напрежение е с величина 0,15 МПа и посока на потъване и наклон 225/45. Ако обаче след няколкостотин метра, поради естественото тектонско нагъване на масива, фолиацията се изправи до $135/88$, върху нея ще действа срязващо напрежение с величина 1,5 МПа. Тоест само поради промяната на наклона на фолиацията, склонността към срязване на метаморфитите нараства 10 пъти. Като прибавим и факта, че обикновено кохезията във фолиирани метаморфити е различна, при тестване перпендикулярно на фолиацията и под малък ъгъл с фолиацията, съотношението достига 3/1 (Goodman, 1989), можем да си представим какво голямо значение има структурната нееднородност върху якостните свойства на масива, при това без да вземаме предвид напукването.

Разбираемо е защо всички схеми на скално рейтингиране са концентрирани върху скалните прекъснатости при оценката на свойствата на масива. За пукнатините е от значение граповостта на техните стени, кохезията и ъгълът на вътрешно триене на минералния пълнеж, степента на отклонение от планарност на пукнатинните повърхности, дължината и т.н.

За съжаление, едно от изискванията за успешна рейтингова схема е, освен да бъде всеобхватна, също да бъде и сравнително проста за изпълнение, а това е очевидно противоречие, с което авторите на тези схеми по принцип не се справят успешно.

Остарели методологии на скално рейтингиране

RMR, GSI, Q-системата и т.н. не са първите предложени класификации с геотехническа насоченост. Преди тях са публикувани класификациите на Протодяконов и Терцаги и други по-малко известни опити. Скалата на Протодяконов, представена в редица доклади между 1906 и 1930 година в Русия, не трябва в никакъв случай да се пренебрегва, защото в крайната си форма (напр. Lomtadze, 1970) е изключително ефективен инструмент за предсказване на склонността на скалите към разрушаване. Тя все още е съвсем актуална при дефинирането на свойствата взриваемост, сондируемост, склонност към разтрошаване и др. Днес намира по-малко приложение, защото нейните “case studies” са остарели, понеже никой вече не крепи подземни изработки с трапецовиден дървен крепеж, подобно на скалата на Терцаги, която се използва по-малко, поради това, че все по-рядко се крепи само със стоманен крепеж, но и двете схеми стъпват на солидни геоложки основи.

Скала на Протодяконов

Коефициентът на Протодяконов засега е основен параметър при рутинното изготвяне на паспорти на взривни работи и при оценката на сондируемостта на скалите. До началото на 90-те години на XX век той беше основополагащ при проектирането на подземни и открити миннодобивни работи в България.

Същността на този коефициент е следната:

Вълната на разширяващия се газ, произведен от експлозия, разрушава скалата чрез опън и натиск. Якостта на динамично натоварване определя взриваемостта на скалата. От своя страна, якостта на динамично натоварване е пряко свързана с якостта на триосов натиск. Само че последната се измерва трудно. Затова се правят тестове на едноосов натиск, тъй като якостта на едноосов натиск има силна линейна корелация с якостта на триосов натиск.

Коефициентът на Протодяконов, който зависи от едноосовата статична якост на скалата, е достатъчно точно приближение на свойството взриваемост и служи за класифициране на скалите на групи.

Той се определя по формулата

$$F = \sigma/K, \text{ където}$$

F е коефициентът на Протодяконов, σ е едноосовата якост на скалата в МРа, K е коефициент, равен на 10МРа.

Според данните за стойността на коефициента F, Протодяконов класифицира скалите на 10 групи. Базалтът и кварцитът се определят като най-здрави с $F = 20$. Здравият гранит има $F = 15$, здравият пясъчник – $F = 6-8$, твърда глина – $F = 1$.

В практиката коефициентът на Протодяконов се определя визуално на базата на опита на анализатора. Следва да се има предвид обаче, че за един и същи тип скала този коефициент варира според степента на напуканост, изветрянето, наличието на каверни и пори, наличието на слаб минерален матрикс (напр. кварцов пясъчник с калцитна спойка) и др. Следователно, надеждното определяне на коефициента изисква наблюдения върху нееднородностите на скалата, които са по същество структурно-геоложки наблюдения.

Идеята, заложена в класификацията на Протодяконов, е доразвита в по-късните класификации, които се използват широко днес.

Класификация на Терцаги за нуждите на тунелното строителство

Най-ранният цялостен опит за рейтингиране на скалния масив (след Протодяконов) за целите на проектирането на тунели, е направен от Terzaghi (1946) – скалният товар, носен от стоманен крепеж, е оценен на базата на описателна класификация. Описанията на класовете скали, включени в тази публикация, са от общ интерес, защото привличат вниманието към тези характеристики, които определят носещите способности на масива в случаите, когато гравитацията е доминиращата сила.

Непокътната скала. Не съдържа пукнатини. Следователно тя не се разрушава по стари пукнатини, а по такива, формирани по време на процеса на разрушаване. При нарушения, предизвикани от взривяване, се формират люспи в тавана на подземните изработки (spalling), които могат да паднат няколко часа или дни след взрива. В здравите непокътнати скали може да се прояви спонтанното отделяне на плочи в тавана или стените поради разтоварване на еластични напрежения.

Стратифицирана (наслоена) скала. Тя се състои от слоеве, които се отделят един от друг със слаба или никаква съпротива. Зоните на слабост са по границите на слоевете. Скалата може да е отслабена от напречни на наслояването пукнатини. Отлепването на люспи и плочи в стени на изработките в такава скала е много често.

Умерено напукана скала. Съдържа издържани и тънки като косъм, неиздържани пукнатини, но се разпада на блокове, които не са напълно

отделени един от друг, а са сраснали по някои от стените си или са така сложно взаимосвързани, че вертикалните стени не изискват допълнителен крепеж отстрани. В тези скали се срещат отлепване и/или изхвърляне на пластини по новоосвободени скални повърхности.

Напрошена, но химично непокътната скала. Свойствата на такава скала зависят от това дали фрагментите са еднородни по размер или са разнородни и каква е едрината им. Ако фрагментите са дребни и еднородни, скалата има свойствата на несвързан пясък.

Изстискаваща се (изцеждаща се) скала. Тя пълзи бавно към тунела без визуално установима промяна на обема. Обикновено такива скали имат значително количество микроскопична или субмикроскопична слюда или глинести минерали с малък капацитет за подуване (неекспандиращи глини).

Подуваща се скала. Напредва към празното пространство на тунела за сметка на изменение на обема. Способността да се подува се определя от количеството на подуващите се глини, като например такива от групата на монтморилонита.

Методика за инженерно-геоложко описание на сондажна ядка за целите на рейтингирането

Успешното геотехническо рейтингиране на масива изисква подготвителна работа и систематично провеждане на редица мероприятия през целия период от предварителното проучване до проучването, съпътстващо строителството. Задължителните са структурно-геоложко картиране на терена, където ще се разположи съоръжението и подходящо описание на скалната ядка, което да съответства на рейтинговата схема, която ще се приложи. В този смисъл е редно да отбележим, че инженерно-геоложките сондажни колонки, които се представят в докладите от проучването в България, много често не отговарят на нуждите на най-разпространените рейтингови схеми. Липсват им най-малко два задължителни параметъра на оценка: степен на изветрялост на ядката (табл. 1, 2) и физико-механични свойства на ядката (Brown, 1981), оценени с подръчни средства (табл. 3). Тези два параметъра обикновено се подразделят на 5, 6 или 7 класа, а рейтингите в общоизвестните рейтингови скали са 5 или 6, така че изветрялостта и якостта с подръчни средства могат да се корелират с рейтингите по RMR, GSI и др. Нещо повече, те са развити в такива класове именно за да бъдат използвани при рейтингирането. Наблюденията на автора са, че тези два параметъра се

прилагат рядко в докладите, а ако това се направи, то не е във вид, в който могат да се използват. По тази причина се предлага долният текст.

Разграничаване на строителна почва от скала

Рейтингирането по принцип се прилага за скални масиви, но освен скална механика има и механика на строителните почви, като в редица случаи инженер-геолозите се затрудняват да ги разграничат. Геоложкото наименование на скалата – гранит, мергел, пясъчник и т.н. невинаги определя физико-механичните ѝ свойства. Има прахови, слабо свързани мергели с кредна възраст или силно изветрели гранити, както и много други литоложки типове, които нямат скални свойства. Основният критерий за разграничаване на скала, строителна почва или полускала, често е изветрянето на материала, а не първоначалната му геоложка форма. Отговор на въпроса, какво е скален материал и какво не е, може да се намери в таблица 1.

Скала за степента на изветряне

В този текст се използва приетата в световната практика класификация на Международното дружество по скална механика (ISRM, 1978) (табл. 2). При последната степен (VI или W_5) скалата е напълно разложена. Напълно свежа скала (клас W_0) се среща само в дълбочина поради затрудненото проникване на изветрителни агенти дълбоко в скалата. Здравите скали от клас W_1 и W_2 са с добри физико-механични показатели, поради което се използват за практически цели. Скали от клас W_3 и W_4 са с влошени свойства.

За определяне на степента на изветряне се използват достъпни методи, като наблюдение с просто око и геоложка лупа на минералния състав, оценка на звука при удар с чук, наблюдение на отпечатъка, оставен от чука, мачкане на скалата с ръка, наблюдения на пукнатините и др.

В минното дело и при инженерно-геоложките изследвания от съществено значение е установяването на границата на изветрянето, до която скалата може да се извеза с режещи инструменти като лопата и кирка, багерна кофа, фадрома и др. От гледна точка на изкопните работи, в минното дело се разграничават два типа откривка – „мека“ и „твърда“. Първият тип е представен от почвен слой с или без фрагменти от полуразложена скала. В плитките долини или върху плато-видните участъци този почвен слой е по-дебел и издържан. В дълбоките долини буйните водни

Таблица 1

Схема от непубликуван лекционен курс на Карл Терзаги за разграничаване на изветряла скала от строителна почва, възпроизведена от Goodman (1976)

Table 1

Key from an unpublished lecture course of K. Terzaghi, for separation of weathered rock from engineering soil, published in Goodman (1976)

В първично (оригинално) състояние	Състояние след многократно изсушаване, омокряне и разклащане или след продължително излагане на атмосферни условия	Изменения на обема в резултат на насищане с вода и осушаване на скалните фрагменти	Класификационна група
Твърда скала, издава звънтящ звук при удар с чук	непроменено	незабележима промяна на обема	а) твърда скала
	разпада се на малки твърди фрагменти с чисти повърхности		б) финонапукана или натрошена, непроменена скала
Твърда скала, издава приглушен, тъп звук при удар с чук	разпада се на малки фрагменти с мазни повърхности поради присъствието на финозърнести изветрителни продукти		в) слабо (леко) разложена, напукана скала
	разпада се на индивидуални пясъчни или алевритни зърна		г) пясъчник или глинеста (алевритово-пелитна) скала с нестабилен цимент
	разпада се на малки, ъгловати фрагменти без каквато и да е индикация за химическа промяна	измерима промяна в обема	д) преходна разновидност между скала и глина, като скалните свойства преобладават
Твърда скала, издава приглушен, тъп звук при удар с чук	постепенно се преобразува в суспензия от почвени частици		е) преходна разновидност между скала и глина, като свойствата на глината преобладават
	преобразува се в суспензия от глинести частици и седимент от ъгловати скални фрагменти		ж) напълно разложена скала
	изцяло се преобразува в суспензия и/или несвързан седимент	незабележима до значителна промяна на обема	з) глина, алевролит или фин пясък в сухо или уплътнено състояние

потоци отнасят почвената покривка и разложената скала. В дълбочина почвеният слой преминава в несвързана маса от изветряла скала (клас W_5 и W_4), която може в известна степен да се разкопае с обикновени земекопни инструменти и багери. Под тази зона, макар и изветряла, скалата не позволява проникване с кирки, лопати, багерни кофи и т.н. Класовете W_3 , W_2 и W_1 по ISRM представляват „твърдата откривка“. Нейното премахване може да стане само чрез пробивно-взривни работи.

Определяне на якостните свойства на скалите с подръчни средства

Макар и приблизително якостните свойства на скалата могат да се оценят още в разкритието, стената на изкопа или от сондажната ядка. Разбира се, това е приблизителен метод, но много често по-точен, отколкото вземането на 1–2 про-

би от сондаж и извършване на лабораторни тестове, защото скалите в сондажа се различават винаги по своите свойства. Отделни участъци са здрави, но има изветрели, напукани или просто слаби скални разновидности, които не могат да бъдат тествани лабораторно. Обикновено се вземат проби от по-здравите скали (за да не се разпадат по пътя към лабораторията) или тенденциозно, от по-слабите или от по-здравите в зависимост от внушението, което геологът иска да направи на проектантите или на инвеститорите. Визуалната оценка на място (табл. 3) изисква значителен опит. Този подход обаче позволява да се оцени целият скален интервал и при необходимост да се коментират с количествени средства най-характерните черти от строежа на скалата, които ще доминират нейното разрушаване. По същество това е начална форма на рейтингиране и би трябвала винаги да присъства в описанието на сондажната колонка. Авторът на тази работа досега не е виждал у нас колонки, в

Таблица 2

Критерии за определяне на степента на изветряне на скалите (ISRM, 1978)

Table 2

Criteria for determining the degree of rock weathering (ISRM, 1978)

Символ ISRM, 1978)	Текстура и структура	Минерали	Твърдост	Звук при удар с чук
W ₀	скалообразуващите минерали не са променени; изключително тесни пукнатини	няма изветрели минерали	много твърда скала	ясен звук
W ₁	скалата е твърда, здрава; няма отворени пукнатини	слабо изветряне на скалообразуващите минерали	много твърда скала	ясен звук
W ₂	скалната маса е сравнително здрава; сцеплението по пукнатините е леко понижено	скалообразуващите минерали са подложени на изветряне с изключение на кварца	отделяне на блокове (късове) с тежък удар с чук	леко приглушен звук
W ₃	намалено сцепление; отделяне на скални късове при нормален удар с чук	скалообразуващите минерали са омекотени с изключение на кварца	„омекотена“ скала	приглушен звук при удар с чук
W ₄	първичната структура е все още запазена	скалообразуващите минерали са омекотени	силно „омекотена“ скала; раздробяване на скалата от лек удар с чук или от натиск с пръст	забележително приглушен звук
W ₅	напълно раздробена и дезинтегрирана скала, грус	останали са устойчивите на изветряне минерали, глинести минерали		

които да е отредено място за полуколичествена субективна оценка на степента на изветряне и визуално установената якост.

Най-често използвани съвременни рейтингови системи

Качество на сондажната ядка – Rock quality designation (RQD)

Индексът за качеството на скалата (Rock quality designation – RQD) е разработен и предложен в края на 60-те години на миналия век (Deere, 1963; Deere, Miller, 1966; Deere, Deere, 1988) като мярка за способността ѝ да поддържа тунели. Основното достоинство на метода е неговата простота, но не бива да се пренебрегва, че има много ограничения. Същността му е в това, че се измерва количеството на „добра скала“, която е подсечена в сондаж. Поне на теория се пред-

полага, че чрез този метод ще бъдат очертани зоните от слаби скали, през които ще премине инженерното съоръжение.

Първоначално методът е предложен за ядка с диаметър 54,7 mm при технология на сондиране с двойна борна тръба. При сондирането се отброяват парчетата от ядка с дължина над 100 mm: отчита се дължината на всеки просондиран интервал. Той зависи от дължината на борната тръба, но може да бъде и по-къс, поради някаква техническа причина. Ядката се изважда и се разстила в сандъци, след което се измерва сумарната дължина на всички късове от ядка, които са по-дълги от 100 mm. След това се прави изчисление по формулата

$$RQD = \frac{\text{(сумарна дължина на късовете)}}{\text{(обща дължина на рейса)}} \cdot 100\%$$

Например, ако имаме напредък от 2 m и в този напредък сме определили късове с дължина

Таблица 3

Градации на якостните свойства на скалите, определени чрез подръчни средства по Brown (1981)

Table 3

Gradation of the strength properties of the rocks, found by simple tests, proposed by Brown (1981)

Рейтинг	Описание	Якост на едноосов натиск (MPa)	Якост на точково натоварване (MPa)	Теренна оценка на якостта	Примери
R6	изключително здрава	>250	>10	образецът може да бъде отчупен само със силни удари на геоложки чук	свеж базалт, кремък, диабаз, гнайс, гранит, кварцит
R5	много здрава	100–250	4–10	образецът изисква много удари с геоложки чук	амфиболит, пясъчник, габро, гнайс, гранодиорит, перидотит, риолит, туф
R4	здрава	50–100	2–4	образецът изисква повече от един удар с геоложки чук за разчупване	варовик, мрамор, пясъчник, шист
R3	умерено здрава	25–50	1–2	образецът не може да бъде надраскан или изстърган с джобно ножче, но може да бъде разчупен с един удар на чук	бетон, филит, шист, пясъчник
R2	слаба	5–25		образецът може да бъде изстърган с джобно ножче, но трудно; при удар с шилото на чука в него остава отпечатък	креда (мек, пишещ варовик), аргилит, морска сол, алевролит, глинесто-пелитни скали
R1	много слаба	1–5		скалата се мачка при силен натиск с шилото на геоложкия чук; добре се стърже с джобно ножче	силно изветрели или променени скали, глинесто-пелитни скали
R0	изключително слаба	0–1		скалата се драска с нокът или се мачка с пръсти	плътна разломна глина или катаклазитен пълнеж

Заб.: точковата якост на скали с едноосова якост <25 MPa е променлива и несигурна; якостните свойства на скалите с едноосова якост <25 MPa варират силно в масива.

съответно 0,15 m, 0,22 m, 0,30 m, 0,30 m и 0,25 m, имаме $RQD = (1,22/2) \cdot 100\% = 61\%$.

Авторите на метода препоръчват следната класификация на скалите (RQD):

- 0–25% – много лоша скала;
- 25–50% – лоша скала;
- 50–75% – задоволителна скала;
- 75–90% – добра скала;
- 90–100% – отлична скала.

Предполага се, че ядката се е разпаднала на късове по естествените пукнатини в скалния масив. Парчетата се измерват по централната линия от край до край. Препоръчва се техногенните пукнатини, които са предизвикани от самото сондиране, да се напасват и да се мери

дължината на парчето през тях. Това обаче е при условие, че операторът може да разграничи техногенна от природна пукнатина. В повечето случаи такова разграничаване е невъзможно или поне за повечето асистенти на сондажа. Ядката обикновено е омазана със сондажен флуид, а техногенните пукнатини се срещат доста често.

RQD се използва като задължителен параметър и в систематиките на Bieniawski (1976, 1989) и Barton et al. (1974). Основният проблем на RQD е, че дава едноизмерна оценка, базирана на късове по-дълги от 0,1 m. Например, вертикалният сондаж може изобщо да не подсече вертикални пукнатини, въпреки че такива има в масива или пресича рядко стръмно потъващи

пукнатини, като по този начин RQD подценява силно разпространението им.

Правени са опити да се изведе емпирична зависимост между броя на пукнатините в кубичен метър и RQD. Palmstrom (1974) предлага зависимостта

$$RQD = 115 - 3,3J_v,$$

където J_v е броят на пукнатините в кубичен метър. Тази зависимост е използвана от Barton et al. (1974) при дефинирането на тяхната Q-система на рейтингиране. Независимо от сериозните изследвания по въпроса (Palmstrom, 2005; Palmstrom, Broch, 2006) параметърът RQD си остава едно от най-слабите места и на RMR и на Q-системата. Една от най-грубите грешки е да се отброява RQD при сондиране с едностранна борна тръба.

Рейтингиране по Биенявски

Рейтингът на масива, или RMR (rock mass rating) по Bieniawski (1976, 1989), се определя най-вече от следните параметри:

- 1) Якост на едноосов натиск на скалата;
- 2) означение за качеството на скалата (Rock Quality Designation – RQD) съгласно резултатите от ядковото сондиране;
- 3) степента на изветряне;
- 4) разстояние между скалните прекъснатости (пукнатини, разломи, контакти, междупластови повърхности и др.);
- 5) състояние на скалните прекъснатости (грапавина на пукнатините, тип на минералното запълнение на пукнатините);
- 6) състояние на подпочвените води – водообилност;
- 7) ориентация на скалните прекъснатости (пукнатини и разломи) спрямо ориентацията на проектираните скални откоси или тунела.

При прилагането на класификационната система теренът се разделя на структурни домени в съответствие с тектонските и литоложките фактори, като тези домени се класифицират отделно. Границите им съответстват на значими разломи или промяна на литоложкия (петрографски) тип на скалата. В случай на по-голяма изменчивост на свойствата, определена от гъстотата на напукване, интензивността на изветряне, тектонската преработка или алтернативата на скални разновидности с различни физични свойства, домени се разделят на поддомени.

В таблица 4 е дадена обобщената схема за класифициране по Bieniawski (1976, 1989).

Същността на рейтингирането е да се сумират точките по рейтингите за всички параметри,

които могат да бъдат определени, чрез наблюдение или измерване, при което скалата попада в един от петте класа – много лоша, лоша, задоволителна, добра и много добра. За всеки от тях е даден интервал от физико-механични стойности, които се присъждат на масива. Например „задоволителната“ скала има кохезия между 200 и 300 kPa и фрикционен ъгъл на скалния масив между 25 и 35°.

За прилагането на рейтинговата схема се налага количествено или полуколичествено определяне на водоприток, определяне на якост на едноосов натиск и измерването на гъстотата и ориентацията на пукнатините и разломите. Също така, изискват се данни за размера на късовете, получени при ядковото сондиране (RQD).

Различните скали и части от масива се рейтингира с различна лекота. Представа за затрудненията може да се получи, ако се анализира пример за рейтингирането на валунните отложения, изградени от гранитни фрагменти, включени сред глинесто-песъчлив, неуплътнен матрикс. Такива се срещат по трасето на магистрала „Струма“ в предпланинското стъпало на Пирин (Калиманска свита). На първо време в тези валунни отложения може да се получат здрави късове от гранитна ядка, но тя идва от несвързани валуни, плуващи свободно в глинесто-песъчлив матрикс, затова и параметърът RQD за тези скали е невалиден. Тъй като връзката между валуните и матрикса е слаба, границите между пясък и гранит по повърхността на отделните валуни не се описва добре от схемата на Биенявски. Затова би трябвало на тези отложения да се присъдят свойствата на несвързан пясък или глинест пясък, но не и на скала. Подобни затруднения възникват при рейтингирането на всеки масив, но могат да се преодолеят с въображение и известно модифициране и нагаждане на първоначалната идея на схемата.

Съществен недостатък на класификацията е, че в нея не са включени параметри за оценка на скални удари и изстискващи и раздуващи се скали. Не се разбира как и къде е отразена ролята на разломите и зоните на слабост, породени от текстурна нееднородност, като например слоеве с различни реоложки свойства. Не са ясно дефинирани и понятията благоприятна и неблагоприятна ориентация на скалните прекъснатости. Скалните прекъснатости създават благоприятна или неблагоприятна обстановка чрез своето взаимодействие една с друга, а не поединично (фиг. 1, 2). За такива оценки е нужен структурен кинематичен анализ на тези прекъснатости (напр. Dimitrov, Vasilev, 2011), но за такъв не се говори в класификацията.

Таблица 4
Рейтинги по Bieniawski (1976, 1989)

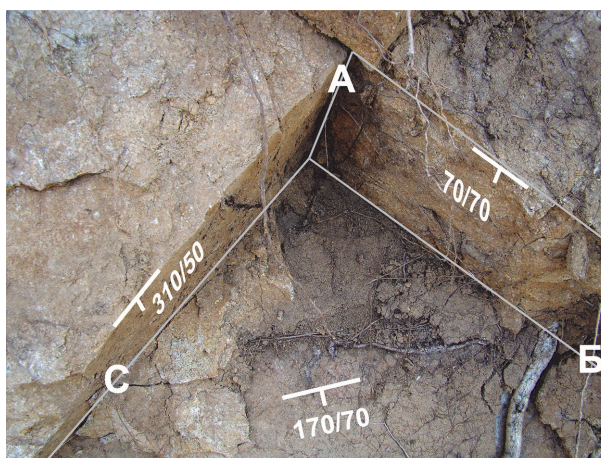
Table 4
Rating system according to Bieniawski (1976, 1989)

А. Класификационни параметри и техният рейтинг									
Параметър		обхват на стойностите							
1	Якост на ненарушения материал	якост на точково натоварване	>10 МПа	4–10 МПа	2–4 МПа	1–2 МПа	якост на едноосов натиск		
		якост на едноосов натиск	>250 МПа	100–250 МПа	50–100 МПа	25–50 МПа	5–25 МПа	1–5 МПа	<1 МПа
	<i>Рейтинг</i>		15	12	7	4	2	1	0
2	Качество на сондажната ядка <i>RQD</i>		90–100%	75–90%	50–75%	25–50%	<25%		
	<i>Рейтинг</i>		20	17	13	8	3		
3	Разстояние между скалните прекъснатости		>2 m	0,6–2 m	200–600 mm	60–200 mm	<60 mm		
	<i>Рейтинг</i>		20	15	10	8	5		
4	Състояние на прекъснатостите – пукнатини и разломи (виж Д)		редки прекъснатости, много груби повърхности, затворени – в неизветряла скала	леко груби повърхности, отворени, но с отделяне <1 mm – скалата е леко изветряла	леко груби повърхности, отворени, но с отделяне <1 mm – скалата е силно изветряла	чести повърхности с харниши, стриации и тектонско брашно, дебели <5 mm или с отделяне между 1–5 mm	чести зони с меко тектонско брашно с дебелина >5 mm или отделяне между повърхностите >5 mm		
	<i>Рейтинг</i>		30	25	20	10	0		
5	Подпочвени води	приток (l/m) за 10 m дължина на тунела	няма	<10	10–25	25–125	>125		
		(водно налягане в пукнатините)/ (главно напрежение (σ))	0	<0,1	0,1–0,2	0,2–0,5	>0,5		
		обща условия	напълно сух	влажен	мокър	прогизнал	напълно оводнен		
	<i>Рейтинг</i>		15	10	7	4	6		
Б. Рейтинг за настройване съгласно ориентацията на прекъснатостите									
	Посока и наклон на прекъснатостите		много благоприятна	благоприятна	задоволителна	неблагоприятна	много неблагоприятна		
	<i>Рейтинг</i>	тунели и минни изработки	0	-2	-5	-10	-12		
		фундаменти	0	-2	-7	-15	-25		
		откоси	0	-5	-25	-50			
В. Класове на скали, определени от тоталните рейтинги									
Рейтинг			100–81	80–61	60–41	40–21	<21		
Номер на класа			I	II	III	IV	V		
Описание			много добра скала	добра скала	задоволителна скала	лоша скала	много лоша скала		

Г. Значение на скалните класове					
Номер на класа	I	II	III	IV	V
Средно време на запазване в отвесно състояние на стена с определена височина	20 години за 15 m	1 година за 10 m	1 седмица за 5 m	10 часа за 2,5 m	30 мин. за 1 m
Кохезия на скалния масив (kPa)	>400	300–400	200–300	100–200	<100
Фрикционен ъгъл на скалния масив (deg)	>45	35–45	25–35	15–25	<15
Д. Указания за класифициране на скалните прекъснатости					
Устойчива дължина на прекъснатостите	<1 m	1–3 m	3–10 m	10–20 m	>20m
Рейтинг	6	4	2	1	0
Отделяне (апертура) на прекъснатостите	напълно затворени	<0,1 mm	0,1–1,0 mm	1–5 mm	>5 mm
Рейтинг	6	5	4	1	0
Грапавина на стените	много груби	груби	леко грапави	гладки	полирани
Рейтинг	6	5	3	1	0
Запълване на прекъснатостите	никакво	твърд минерален пълнеж <5 mm	твърд минерален пълнеж >5 mm	мек пълнеж <5 mm	мек пълнеж >5 mm
Рейтинг	6	4	2	2	0
Изветряне на стените	свежа	слабо изветряла	умерено изветряла	силно изветряла	разложена
Рейтинг	6	5	3	1	0
Е. Ефект на ориентацията на прекъснатостите в тунели					
Посока, перпендикулярна на оста на тунела			посока, паралелна на оста на тунела		
По наклона		наклон 45–90°		наклон 20–45°	
Наклон 45–90°	наклон 20–45°	много благоприятна		задоволителна	
Срещу наклона		наклон 0–20° независимо от посоката			
Наклон 45–90°	наклон 20–45°	задоволителна			
Задоволителна	неблагоприятна	задоволителна			

Фиг. 1. Крайно неблагоприятна пространствена ориентация на три пукнатинни системи по трасето на АМ „Струма“, при която се формират блокове със силна склонност към отделяне под въздействието на гравитацията

Fig. 1. Very unfavorable orientation of three joint systems along the track of the Struma highway, where rock blocks, prone to detachment under the action of the gravity, are formed





Фиг. 2. Взаимодействие между две пукнатинни системи и седиментна слоестост, формиращи призматични блокове в каменопад по жп линия от Западна България

Fig. 2. Interaction between two joint systems and sedimentary layering, forming prismatic rock blocks on a railway slope in West Bulgaria

Рейтингиране по Hoek & Brown – Геоложки индекс за якост (GSI)

Предложеният от Hoek & Brown (1980a, b) емпиричен критерий и схемата за рейтингиране, базирана на него, са добила много голяма гражданственост при емпиричната оценка на скалния натиск в тунели и стабилността на скални откоси. До голяма степен популярността се дължи на това, че критерият е включен в редица геотехнически софтуерни пакети. Уравненията на изчислителната схема бяха преработени многократно (Hoek, Brown, 1988, 2019; Hoek et al., 2002 и др.) и добиваха нова форма при всяка нова публикация. Важно е да се знае, че критерият за разрушаване е разработен въз основа на много малко реално наблюдавани случаи на разрушаване – всъщност само за една скална разновидност, а именно андезит от мината Бугенвил в Папуа Нова Гвинея. Sjöberg (1997) отбелязва, че много инженери са се втурнали да го прилагат без да отделят време да се убедят в неговата валидност.

От съществено значение е класифицирането на скалите и извеждането на индекса. Класифицирането на скалите се прави както в разкрития, така и в сондажна ядка, като изведеният индекс, който се изменя от 0 до 100, практически опре-

деля свойствата на скалата. Класификацията на Hoek & Brown е шестстепенна (фиг. 3) и се корелира с шестстепенната скала на изветрянето на скалите и седемстепенната скала (табл. 3) за определяне на якостните свойства на масива с подръчни средства.

Следва да обърнем внимание на факта, че това съвсем не е единствената графична схема за извеждане на GSI. Особено в по-късните публикации (Marinos, Hoek, 2001; Marinos et al., 2005; Hoek et al., 2005), научната школа около Hoek започна да предлага нова графика едва ли не за всяка литоложка разновидност – за мергел, за моласа, за турбидит, за нашистени метаморфити. Започнаха и да указват какви най-вероятни стойности може да вземе GSI за различните скални разновидности. Този подход е оправдан от геоложка гледна точка, но показва колко предварителен характер са имали ранните публикации за извеждането на индекса GSI.

В момента работата, свързана с използването на GSI, се свежда до използването на всички показани в литературата графики за скална структура и текстура и отсяване на информацията за това как да бъдат определени необходимите за анализа емпирични параметри σ_1 и m_i . От геолозите се очаква да се ориентират в цялата представена в литературата информация и да изберат най-подходящия подход.

Съществуват големи ограничения при използването на GSI. Както вече бе казано индексът е разработен за сравнително масивни интрузивни скали или дебелопластови вулкански скали. Hoek et al. (1995) заявяват, че критерият е приложим само за непокътната скала или напукана скална маса, която може да бъде разглеждана като хомогенна и изотропна. За скали със силна анизотропия от типа на седиментна, вулканска или метаморфна слоестост, редуване на пластове с различни свойства, фолация, разломени скали и др., надеждността на критерия тепърва предстои да се докаже. Освен това, авторите утвърждават, че подходът в GSI системата не работи добре в слаби скали от долната част на скалата от фигура 3. Опитите за пригаждане на методиката за слаби и анизотропни скали (Hoek et al., 1998 и др.) може и да са успешни, но се нуждаят от повече публикувани данни за разрушаване, предсказано от този критерий, за да се демонстрира надеждността му.

Всяка нова модификация на GSI идва с нови и по-сложни числени изрази за всеки от емпиричните членове на главното уравнение на критерия. Тези допълнителни членове могат да се установят само с обширна лабораторна работа. Проблемът е, че първоначалната идея на крите-

<p>От литологията, структурата и състоянието на повърхността на геоложките прекъснатости оценете средната стойност на GSI. Не се опитвайте да бъдете твърде прецизни. Споменаването на обхват от стойности между 33 и 37 е по-реалистично от твърдението, че индексът е точно 35. <i>Обърнете внимание, че таблицата не се отнася за структурно контролирано разрушаване.</i> Когато отслабени структурни плоскости (пукнатини, междуслоеве граници, фолиационни плоскости и др.) се намират в неблагоприятна ориентация по отношение на ориентацията на стените на изкопа, скалния откос или тунелната стена, това ще благоприятства разрушаването на скалата като цяло. Якостта на срязване по повърхности, които се влияят от съдържанието на вода, ще трябва да бъде редуцирана, ако има вода. Когато се работи в скали от категориите задоволителна до лоша, наличието на вода ще премести отчитаните стойности надясно. Налягането на водата трябва да се отчете чрез анализ на ефективното напрежение.</p> <p style="text-align: center;">Структура</p>	<p style="text-align: center;">Състояние на прекъснатостите</p> <p>Много добри Много груби стени със свежи и неизветрели повърхности</p> <p>Добри Груби, слабо изветрели, оцветени от желязо повърхности</p> <p>Задоволителни Гладки, умерено изветрели и променени повърхности</p> <p>Лоши Изветрели, със следи от стриация и с пълнеж от ръбести частици</p> <p>Много лоши Със стриации, силно изветрели с пълнеж от мека глина или други меки минерали</p>																																									
<p style="text-align: center;">Влошаване на състоянието на повърхностите</p> <table border="1"> <tr> <td data-bbox="178 901 273 1030"></td> <td data-bbox="296 901 737 1030">Ненарушена или масивна - ненарушен скален образец или скала, описана като масивна на терена, само с няколко редки прекъснатости</td> <td data-bbox="760 901 873 1030" style="text-align: center;">90</td> <td data-bbox="878 901 991 1030"></td> <td data-bbox="996 901 1109 1030"></td> <td data-bbox="1114 901 1227 1030" style="text-align: center;">N/A</td> <td data-bbox="1232 901 1347 1030" style="text-align: center;">N/A</td> </tr> <tr> <td data-bbox="178 1052 273 1181"></td> <td data-bbox="296 1052 737 1181">Блокова - слабо нарушена скална маса, състояща се от кубични блокове, формирани от три пресичащи се прекъснатости</td> <td data-bbox="760 1052 873 1181" style="text-align: center;">80</td> <td data-bbox="878 1052 991 1181" style="text-align: center;">70</td> <td data-bbox="996 1052 1109 1181"></td> <td data-bbox="1114 1052 1227 1181"></td> <td data-bbox="1232 1052 1347 1181"></td> </tr> <tr> <td data-bbox="178 1203 273 1332"></td> <td data-bbox="296 1203 737 1332">Силно блокова - частично нарушена скална маса с моногостенни блокове с ръбести краища, формирани от 4 и повече пукнатинни системи</td> <td data-bbox="760 1203 873 1332"></td> <td data-bbox="878 1203 991 1332" style="text-align: center;">60</td> <td data-bbox="996 1203 1109 1332"></td> <td data-bbox="1114 1203 1227 1332"></td> <td data-bbox="1232 1203 1347 1332"></td> </tr> <tr> <td data-bbox="178 1353 273 1483"></td> <td data-bbox="296 1353 737 1483">Блокова/нарушена/ивичеста - ивици от ръбести блокове, формирани от много пресичащи се системи от скални прекъснатости. Наличие на слоеви граници или шистозност</td> <td data-bbox="760 1353 873 1483"></td> <td data-bbox="878 1353 991 1483" style="text-align: center;">50</td> <td data-bbox="996 1353 1109 1483" style="text-align: center;">40</td> <td data-bbox="1114 1353 1227 1483"></td> <td data-bbox="1232 1353 1347 1483"></td> </tr> <tr> <td data-bbox="178 1504 273 1634"></td> <td data-bbox="296 1504 737 1634">Дезинтегрирана - лошо пасващи си (слабо зацепени) блокчета от силно разбита маса със смес от ръбести и заоблени фрагменти</td> <td data-bbox="760 1504 873 1634"></td> <td data-bbox="878 1504 991 1634"></td> <td data-bbox="996 1504 1109 1634" style="text-align: center;">30</td> <td data-bbox="1114 1504 1227 1634" style="text-align: center;">20</td> <td data-bbox="1232 1504 1347 1634"></td> </tr> <tr> <td data-bbox="178 1655 273 1785"></td> <td data-bbox="296 1655 737 1785">Ламинирана/срязана - липсва блоковост, поради близко разположени шистозни повърхнини или повърхности на срязване</td> <td data-bbox="760 1655 873 1785" style="text-align: center;">N/A</td> <td data-bbox="878 1655 991 1785" style="text-align: center;">N/A</td> <td data-bbox="996 1655 1109 1785"></td> <td data-bbox="1114 1655 1227 1785"></td> <td data-bbox="1232 1655 1347 1785" style="text-align: center;">10</td> </tr> </table> <p style="text-align: center;">Намалване на задържащата сила между скалните късове</p>			Ненарушена или масивна - ненарушен скален образец или скала, описана като масивна на терена, само с няколко редки прекъснатости	90			N/A	N/A		Блокова - слабо нарушена скална маса, състояща се от кубични блокове, формирани от три пресичащи се прекъснатости	80	70					Силно блокова - частично нарушена скална маса с моногостенни блокове с ръбести краища, формирани от 4 и повече пукнатинни системи		60					Блокова/нарушена/ивичеста - ивици от ръбести блокове, формирани от много пресичащи се системи от скални прекъснатости. Наличие на слоеви граници или шистозност		50	40				Дезинтегрирана - лошо пасващи си (слабо зацепени) блокчета от силно разбита маса със смес от ръбести и заоблени фрагменти			30	20			Ламинирана/срязана - липсва блоковост, поради близко разположени шистозни повърхнини или повърхности на срязване	N/A	N/A		
	Ненарушена или масивна - ненарушен скален образец или скала, описана като масивна на терена, само с няколко редки прекъснатости	90			N/A	N/A																																				
	Блокова - слабо нарушена скална маса, състояща се от кубични блокове, формирани от три пресичащи се прекъснатости	80	70																																							
	Силно блокова - частично нарушена скална маса с моногостенни блокове с ръбести краища, формирани от 4 и повече пукнатинни системи		60																																							
	Блокова/нарушена/ивичеста - ивици от ръбести блокове, формирани от много пресичащи се системи от скални прекъснатости. Наличие на слоеви граници или шистозност		50	40																																						
	Дезинтегрирана - лошо пасващи си (слабо зацепени) блокчета от силно разбита маса със смес от ръбести и заоблени фрагменти			30	20																																					
	Ламинирана/срязана - липсва блоковост, поради близко разположени шистозни повърхнини или повърхности на срязване	N/A	N/A			10																																				

Фиг. 3. Стойности на индекса GSI съгласно напукването на скалата и качеството на скалните прекъснатости (по Hoek, Marinos, 2000)

Fig. 3. Values of GSI according to the fracturing and the qualities of the rock's anisotropies (after Hoek, Marinos, 2000)

рия е да опише свойствата на скалния масив *in situ*, а не отделни лабораторно установени свойства. В резултат на това уж „теренният критерий“ зависи от голям обем лабораторни данни, които ние априори приемаме за дискредитирани и се стремим да избегнем, но въпреки това използваме във все по-големи количества, така че критерият става не *in situ*, а съвсем лабораторен и изключително сложен за прилагане. Можем да се надяваме, както прави мнозинството от редовите инженер-геолози у нас, че компютърните специалисти, които поддържат инженерно-геоложките софтуерни пакети, четат всички публикации за GSI, разбират ги по-добре от геолозите и отразяват промените във формулите, независимо дали знаят каква е разликата между мергел и шист, така че стойностите, получени от софтуера, са достатъчно авторитетни, за да задоволят всеки проектант.

Система на Норвежкия институт по геотехника – Q-система

Q-системата е разработена първоначално за класифициране на скални маси с цел оценка на необходимостта за изграждане на крепеж на тунели и каверни в скалите. Публикувана е за първи път от Barton et al. (1974). Впоследствие е включена като основен фактор в „Новия норвежки метод на тунелно строителство“ (NGI), който пък е разработен в отговор на появилите се „Нов австрийски метод на тунелно строителство“ (NATM) (Palmstrom, Broch, 2006). За разлика от GSI индекса, тази класификация е предложена след проследяване на поведението на крепежите в голям брой реално построени тунели и оценката на успеха или неуспеха на използваните анкери, железобетон, мрежи и др. крепежни компоненти с определена гъстота и дебелина. Получените от класификацията стойности за Q се влагат директно в една графична схема с полета, ограничени от размера на прокопаната каверна (височина, ширина), дебелината на бетона, броя на използваните анкери и др. Схемата има много полезна връзка с възможността да се определи времето на задържане и обема на незакрепеното пространство в челото на забоя, където се работи преди да се положи постоянен крепеж. Всички тези качества дават на тази схема много ясно изразено практическо предимство пред останалите схеми на рейтингиране. То изпъква поради възможността, даже на ранен етап след структурното картиране, да се даде прогнозна цена за строежа на съоръжението, като тя се обвърже с цената и гъстотата на крепежните елементи.

Както и другите рейтингови схеми, Q-системата може да се приложи най-недвусмислено в последния етап на строителство чрез структурно картиране, протичащо едновременно с пробиването на тунела (подземно картиране), тъй като част от данните могат да се съберат едва, когато се отвори кухня в земните недра.

Данните, събирани при Q-системата, на практика са идентични с тези, събирани при извеждане на RMR. Публикувани са съвсем обективни критични работи, в които са указани случаи, при които Q-стойностите не описват обективно геоложките условия (Palmstrom, Broch, 2006). Една от основните критики е, че и в RMR, и в Q-системата се отчитат два параметъра за напукаността – RQD и гъстота и пълнеж на пукнатините, като в някои случаи това води до завишаване на тежестта на напукаността за сметка на другите скални анизотропии и за сметка на условията на полето на напрежения. В доклади, публикувани на норвежки, се твърди (съвсем логично), че и двете схеми не работят добре в слаби и в подуващи се скали. Например, фактор за оценка на напрегнатото състояние в RMR изобщо не е отразен, а в Q системата е обръкващо сложно отразен чрез SRF характеристиката. Липсата на фактор за отчитане на слаби скали в Q-системата от типа на алтернация от компетентни пясъчникови или гравелитни слоеве, разделени от междупластия от глинесто-алевролитов материал, такива каквито се срещат в Палеогена на Източна Стара планина или в Карбона от Софийска Стара планина, е съвсем очевидна.

В Q-системата се говори само за пукнатини, като феномените, описани в тази система, в най-чиста форма се срещат в гранити или гранитогнайси или в друга неслоеста среда с ниска степен на реоложки контраст между слоевете. Пукнатините в слабите седиментни скали са развити напречно на пластовете и са представени главно в твърдите разновидности и никога не са паралелни на меките разновидности. Те нямат характерните признаци на пукнатините, описани в Q-системата. Същевременно, поради флексурния тип нагъване, в слоестите среди се получава „невидимо“ срязване и преместване между слоевете по пластични или полупластични зони, които могат да се проявят както в седиментни, така и във вулкански и метаморфни пакети (фиг. 4), но понеже нямат апертура, минерален пълнеж и стени като пукнатините, не участват в класификацията на Barton et al. (1974). Съществен недостатък на Q-системата, както и на останалите, дискутирани в тази работа класификации е, че не обръщат достатъчно внимание на пространствената ориентация на пукнатините, за които се знае, че при една и съща ориентация,



Фиг. 4. Разпадане на гнайси по отделност, паралелна на метаморфната фолиация

Такава отделност не е описана в дискутираните рейтингови схеми.

Fig. 4. Decomposition of gneisses along the metamorphic foliation

This common case is not accounted in the discussed rating schemes.

имат съвсем различно значение за стабилността на различно ориентирани откоси (Dimitrov, Vasilev, 2010a, b, 2011).

В текста по-долу е представена класификационната последователност на Q-системата по Grimstad & Barton (1988). По-късно методиката бе оптимизирана за работа с тунелна пробиваща машина, за което претърпя критики, тъй като не са обработени достатъчно случаи на оценка за нейната ефективност при този нов метод на проходка (Barton et al., 1992 и др.).

I. Индекс за качеството на скалата – RQD (%):

0–25 – много лоша;

25–50 – лоша;

50–75 – задоволителна;

75–90 – добра;

90–100 – отлична.

Когато RQD е със стойност <10% (включително 0), за оценката се използва номинална стойност от 10%, а RQD в интервала +5÷–5 се приема за достатъчно точно.

II. Брой на пукнатинните системи – Jn:

масивна скала, без пукнатини или съвсем непапукана – Jn – 0,5–1,0;

една пукнатинна система – Jn – 2;

една система плюс случайни пукнатини – Jn – 3;

две системи пукнатини – Jn – 4;

две системи плюс случайни пукнатини – Jn – 6;

три системи – Jn – 9;

три системи плюс случайни пукнатини – Jn – 12;

четири и повече системи плюс случайни пукнатини – Jn – 15;

натрошена скала, много пукнатини – Jn – 20;

За кръстовища на тунели се използва 3xJn. За областта на портали на тунели се използва 2xJn.

III. Грапавост на пукнатинните стени – Jr.

а) Контактиращи пукнатинни стени;

б) пукнатинни стени след не повече от 10 cm срязване по пукнатината:

прекъснати пукнатини – Jr – 4;

груби, вълнообразни – Jr – 3;

гладки, вълнообразни – Jr – 2;

полирани, вълнообразни – Jr – 1,5;

груби или неравни, планарни – Jr – 1,5;

гладки, планарни плоскости – Jr – 1,0;

полирани плоскости – Jr – 0,5.

Описанията се отнасят за дребни до средни по мащаб структури.

в) Стените на пукнатините не контактуват:

пукнатинните стени са разделени от зона с глинести минерали, достатъчно дебела за да възпрепятства контакта – Jn – 1,0;

пълнеж от пясък, гравий или брекча възпрепятства контакта на пукнатинните плоскости – Jn – 1,0.

Добавя се 1 ако гъстотата на пукнатините под въпрос е повече от 3 m. Стойност от 0,5 може да се използва за полирани плоскости с линейност (стриация), ако линейността благоприятства срязването и намалява якостта.

IV. Степен на промяна на пукнатинните стени – ъгъл на триене в градуси (ϕ_r) и индекс на промяна (J_a) (табл. 5).

V. Водно налягане в пукнатините – kgf/cm^2 и индекс за влияние на водата – J_w :

сухи подземни кухини или минимален приток под 5 l/m – налягане $<1 \text{ kgf/cm}^2$, $J_w = 1$;

среден приток или налягане, със случайно измиване на пълнежа на пукнатините – налягане $1-2,5 \text{ kgf/cm}^2$, $J_w = 0,66$;

висок приток или високо налягане, в здрави скали с незапълнени пукнатини – налягане $2,5-10 \text{ kgf/cm}^2$, $J_w = 0,5$;

висок приток или високо налягане, съпроводени от интензивно измиване на пукнатинния пълнеж – налягане $2,5-10 \text{ kgf/cm}^2$, $J_w = 0,33$;

извънредно висок приток или налягане, намаляващи с времето – налягане $>10 \text{ kgf/cm}^2$, $J_w = 0,2-0,1$;

извънредно висок приток или налягане, намаляващи с времето – налягане $>10 \text{ kgf/cm}^2$, $J_w = 0,1-0,05$.

Факторите по-горе са за груба оценка. Увеличете J_w , ако са инсталирани дренажни съоръжения. Специални проблеми, предизвикани от лед, не се разглеждат.

VI. Фактор на редукия заради напреженията – фактор SRF (табл. 6).

Описаните по-горе 6 параметъра се комбинират в уравнението

$$Q = RQD/J_n \times J_r/J_a \times J_w/SRF.$$

Множителите представят различна характеристика на скалите, която има отношение към стабилността. RQD/J_n представя относителният обем на скалния блок, ограничен от пукнати-

Таблица 5
Промяна на пукнатинните стени

Table 5
Joint wall's alteration

Обстановка	ϕ_r	J_a
<i>а) Контактна пукнатинни стени без пукнатинен пълнеж, само оцветявания от хематит и др.</i>		
Пукнатините са плътно запълнени с твърд неразмекващ се водонепроницаем пълнеж, напр. кварц или епидот	–	0,75
Непроменени пукнатинни стени само с повърхностно оцветяване на стените	25–35	1
Слабо пременени пукнатинни стени със запълване от неразмекващи се минерали или свободна от глина дезинтегрирана скала	25–30	2
Облицовка на пукнатинните стени от алевролитов до пясъчно-глинест материал със слабо представена, неразмекваща се глинеста фракция	20–25	3
Размекваща се или пластична глина в контакта между пукнатинните стени, също хлорит, талк, гипс, графит, сапонит и др.	8–16	4
<i>б) Контактна пукнатинни стени. Пукнатинни стени след не повече от 10 cm срязване, тънък минерален пълнеж</i>		
Пясъчни зърна или брекчирана скална маса между пукнатинните стени	25–30	4
Пълнеж от преуплътнени, неразмекващи се глинести частици с до 5 mm дебелина	16–24	6
Умерено уплътнени до преуплътнени, размекващи се глинести частици с дебелина на налепа до 5 mm	12–16	8
Пълнеж от раздуващи се глини, напр. монтморилонит; стойността на J_a зависи от количеството на тези глини, сравнено с неразмекващите се глини, дебелина $<5 \text{ mm}$	6–12	8–12
<i>в) Без контакт на стените при срязване поради дебел минерален пълнеж</i>		
Зони или прослойки от дезинтегрирана скала и глина; виж горните редове за състоянието на глината	8–16	6, 8, или 8–12
Зони или прослойки от пясъчлива глина, малка фракция от неразмекваща се глина	6–12	5
Дебела зона от глина разделя пукнатинните стени; виж горните редове за състоянието на глината	6–24	13–20

Таблица 6
Фактор на редукция заради напреженията – фактор SRF

Table 6
Stress Reduction Factor – SRF

Обстановка	σ_1/σ_3	σ_1/σ_c	SRF
<i>а) Слаби зони, пресичащи тунелите, които предизвикват движения на скална маса при проходката</i>			
Многократно повтарящи се зони на слабост, съдържащи глина или химически дезинтегрирана скала, много слаба скална маса			10
Единична отслабена зона, съдържаща глина или химически дезинтегрирана скала на дълбочина <50 m, слаба скална маса			5
Единична отслабена зона, съдържаща глина или химически дезинтегрирана скала на дълбочина >50 m			2,5
Многократни зони на срязване в здрава скала, без глина			7,5
Единична зона на срязване в здрава скала, без глина, дълбочина <50 m			5
Единична зона на срязване в здрава скала, без глина, дълбочина >50 m			2,5
Хлабави отворени пукнатини, интензивно напукване и други подобни при всякаква дълбочина			5
<i>б) Проблеми със скалните напрежения при здрави скали</i>			
Ниски напрежения близо до повърхността, отворени пукнатини	>200	<0,01	2,5
Умерени напрежения	200–10	0,01–0,3	1,0
Високи напрежения, затворени пукнатини	10–5	0,3–0,4	0,5–2
Отлепване на скални пластини след повече от час	5–3	0,5–0,66	5–50
Силно отлепване и скални удари в масивни скали веднага след отваряне на кухината	3–2	0,65–1	50–200
Тежки скални удари и динамични деформации върху скалите	<2	>1	200–400
<i>в) Изстискващи се скали. Пластично течение на слаби скали под влияние на високи напрежения</i>			
Умерено изстискване		1–5	5–10
Много интензивна изстискване		>5	10–20
<i>г) Подуващи се скали. Химически иницираното подуване зависи от присъствие на вода</i>			
Умерено подуване			5–10
Интензивно подуване			10–15

Заб.:

1) Редуцирай горните стойности за SRF с 25–50%, ако зоните на срязване само влияят на изработките от разстояние без да ги пресичат.

2) За силно анизотропно поле, когато $5 < \sigma_1/\sigma_3 < 10$, редуцирай σ_c до 0,75, когато $\sigma_c \cdot \sigma_1/\sigma_3 > 10$, редуцирай σ_c до 0,5 σ_c , където σ_c е якост на едноосов натиск, σ_1 и σ_3 са главни напрежения в масива, а σ_c е максималното изчислено тангенциално напрежение. При дълбочина на тавана на изработката от няколко метра, завиши стойността на SRF с 2,5–5.

ните. Това в общия случай е невярно, защото, както коментирах по-горе, RQD е едноизмерна величина и подценява количеството на пукнатини с определен наклон, но очевидно за целите на класификацията върши работа, защото авторите не се отказват от него (Barton, Grimstad, 2014). J_r/J_a представя междублоковата якост на срязване. Оценката на този параметър може да е много трудна, защото в теренни условия е невероятно трудно да се оцени дали по пукнатината има акумулирано срязване с 10 cm амплитуда. По дефи-

ниция такава пукнатина вече не е пукнатина, а малък разлом. Така че в оценителните таблици би било по-добре да фигурира понятието малък разлом. Тогава разбира се възниква въпросът каква е разликата със среден или голям разлом.

Оценката на количеството вода или налягането на водата (J_w) в пукнатините по правило е приблизителна и много относителна, защото измерването обикновено е невъзможно. Множителят J_w/SRF е критикуван от Hoek (2004), като според него J_w и SRF не могат да се комбини-

рат, тъй като в едни случаи работят съвместно и саботират стабилността на съоръжението, а в други случаи взаимно се улавняват, така че зависимостта им би трябвало да бъде много сложна.

Практическото прилагане на рейтинговите схеми

Геотехническите класификации са твърде несвършени, но много необходими при изпълнението на големи инфраструктурни обекти. Те, както обръщат внимание Barton & Grimstad (2014), са удобни и за адвокатите в случай, че се потърси съдебна отговорност при провалени проекти. Тъй като тези класификации са в същността си геоложки оценки, те изискват значителен геоложки опит. За съжаление, описанието на ядката на етап идеен или технически проект, или предварителното сондиране и картирането на пътни откоси и тунели обикновено се възлага на начинаещи, нископлатени геолози, които не познават същността на методиките. У нас има и инвеститори, които умишлено избягват геоложките проучвания, за да могат да претендират на по-късен етап за щети от недоизяснена геология, когато стане ясно, че предложената от тях дъмпингова цена не е достатъчна за да приключи проектът. Като допълнителни фактори, възпрепятстващи успешното им прилагане, поне в България, могат да се изредят: липса на обучение по инженерна петрология, съкратени курсове по структурна геология, или пълна липса на такова обучение за специалности с проектантска насоченост. У нас липсва и подходящо учебно пособие, илюстриращо прилагането на методиките в разнообразни геоложки условия.

Всяка от изброените по-горе рейтингови схеми има специфики на приложението, предимства и недостатъци.

Основното предимство на RMR е, че се прилага лесно. Основният, при това голям недостатък е, че е нечувствителна към по-слаби изменения в стойностите на RMR. За пример ще дадем естествения процес на изготвяне на проект на скъпоструващо съоръжение. В него неизбежно има етап, при който инвеститорите оказват натиск върху проектантите да намалят цената на проекта. Проектантите обикновено виждат като единствена възможност оптимизиране на конструкцията, така че нейните отделни части да са с различна цена на вложените материали. Въпросът, който задават те, е дали тунелът преминава през едни и същи скали? Няма ли по-здрави и по-слаби участъци, така че в тези участъци да заложат различно количество или различен тип

крепежни елементи? Идеята е цената да намалее от участъците, в които нуждата от скъп постоянен крепеж е по-малка. Разбира се, отговорът е, че в повечето случаи геоложките условия по протежение на съоръжението не са еднакви. Има действително по-слаби и по-здрави участъци, а оттук възниква натиск геолозите да прекаатегоризират трасето на съоръжението, като го разбият на участъци с различни RMR, съответно Q-стойности. Това, разбира се, може да стане само чрез много детайлно геолошко проучване. В такива случаи детайлността на диференциацията, която е възможна с RMR, отстъпва на тази, която може да се направи с Q-системата, главно поради това, че в Q-системата възможностите за изменчивост на свойствата на пукнатините са разписани малко по-детайлно. Изказвани са твърдения (главно от конкурентни автори на подобни системи), че RMR стойностите занижават качествата на масива, като така оскъпяват конструкцията. Не бива да се забравя, че RMR е базирана на по-малък брой наблюдавани съоръжения. В последните редакции на тази система са внесени редица подобрения и броят на проследените съоръжения е увеличен (Rehman et al., 2018). Системата е подходяща за етапа на предварителна оценка и планиране, но не и за конструктивния етап, когато възникващите проблеми ще са свързани по-скоро с ефекта на индивидуални структури, като разломи, пластове от глинясали скални разновидности и др., отколкото със скалния масив като цяло.

Q-системата също има редица ограничения. В нея не се използва лабораторна едноосова якост, която все пак е важна характеристика. Не се отчита ефектът от ориентацията на пукнатините, нито дължината им, нито формата и пространствената ориентация на блоковете, които те създават. Това, повече или по-малко, е слабост и на RMR. Данните, които се събират и при двете системи, са на практика едни и същи, затова е целесъобразно в геоложките доклади да се дават и стойностите за RMR, и стойностите за Q.

По отношение на критерия на Hoek & Brown (2019) може смело да се каже, че той никога няма да замести проверения във времето критерий на Мор-Куломб, но си остава любимо упражнение за ентузиаста, както иронично подхвърлят Barton & Grimstad (2014). Що се отнася до GSI индекса, той е доста беден откъм геоложки свойства, които се описват, като голяма част от работата по него се свежда до лабораторни тестове за определяне на константите и до търсене в литературата на подходящата публикация, даваща идея за емпирични уравнения, които ще бъдат подходящи във всеки конкретен случай.

Изводи

Геотехническите скални класификации са подходящи за етапа на предварителното и детайлно планиране на съоръженията, но не и за крайния етап на строителството. Те са разработени за строителство на тунели и там действително имат съществени предимства, които изчезват бързо, когато се правят опити да се използват да предсказване на поведението на склонове или на пробиваемостта с тунелни машини, просто защото в тях липсват параметри, подходящи за такава оценка. Например, пробиваемостта с тунелна машина зависи силно от минераложките и петрографските свойства на скалите, определящи тяхната абразивност, а в тези класификации липсва детайлно разглеждане на петрографията. Неразумно е да се правят опити за преизчисляване на класически параметри на масива, като кохезия и ъгъл на вътрешно триене чрез данни от GSI, просто защото първоначалната идея на този критерий е съвсем друга.

Рейтингирането е свързано с детайлно картиране, затова ако детайлна карта не е приложена или не може да се направи поради липса на разкрития, недостатъчно сондажи, канали и т.н., рейтингирането е несериозно. То трябва да се съпътства от геометрични анализи на геоложки прекъснатости, такива като фрикционен конус на Талобър (Talobre, 1957), реконструкция на формата на блоковете, кинематични анализи на стабилността на скални пластини и т.н. Рейтингирането трябва да се възлага на най-опитните геолози, а не на такива, които тепърва навлизат в занаята. Всички рейтингови схеми са разработени за сравнително здра-

ви изотропни, но напукани скали. В тях не са заложили геоложки критерии за описване на анизотропни скали, каквито обаче са повечето скални комплекси.

Очевидно всички автори на рейтингови схеми са бягали от слоестата среда. За Бъртън и съватори може да се намери извинение, като се отчете, че в Норвегия преобладават здравите кристалинни скали, предимно гранити и метаморфити. Като се проследят в литературата обаче претенциите за универсалност на схемите, следва да не бъдем толкова снизходителни към авторите им. В райони с широко развитие на млади седиментни и вулкански скали рейтингирането по всички основни схеми е трудно приложимо. На такива места много отчетливо в паметта трябва да стои скалата на Протодяконов, тъй като тя има по-голяма универсалност.

Схемата на Биенявски страда от неясноти по отношение на прилагането на някои от нейните класификационни параметри. Например, благоприятната и неблагоприятната ориентация на една или друга пукнатина система всъщност зависи от формата на блоковете, които тя създава заедно във всички останали пукнатинни системи, а за такава оценка е нужен пълен кинематичен анализ, какъвто схемата на Биенявски по условие не изисква. Проблематична е необходимостта от оценка за стоене в ненарушено състояние на откоси с определена височина “stand up time”.

Критерият RQD е полезен само при действително много качествено сондиране и ако данните за RQD се допълнят с измерване на пукнатини от разкрития чрез оценка на обемната напуканост (Palmstrom, 2005).

Литература

References

- Babunska-Ivanova, N. 2017. Determining of the relationships between RMR and Q-system during tunnel construction. – In: *International Scientific Conference “Transport 2017”, “Todor Kableshkov” University of Transport. Mehanika. Transport i Komunikatsii J.*, 15, 3, 35–40 (in Bulgarian with English abstract).
- Barton, N., E. Grimstad. 2014. *Forty Years with the Q-system in Norway and Abroad*. Oslo, Fjellsprengningsteknikk, NFF, 25 p.
- Barton, N., R. Lien, J. Lunde. 1974. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. – *Rock Mechanics*, 6, 4, 189–236.
- Barton, N., E. Grimstad, G. Aas, O. A. Opsahl, A. Bakken, E. D. Johansen, O. Pedersen. 1992. Norwegian method of tunnelling. – *World Tunnelling*, 5, June, 231–236, August, 324–328.
- Bieniawski, Z. T. 1976. Rock mass classification in rock engineering. – In: Bieniawski, Z. T. (Ed.). *Exploration for Rock Engineering*. Cape Town, Proceeding of the Symposium, Balkema, 1, 97–106.
- Bieniawski, Z. T. 1989. *Engineering Rock Mass Classifications*. New York, Wiley, 249 p.
- Bott, M. H. P. 1959. The mechanics of oblique slip faulting. – *Geol. Mag.*, 96, 109–117.
- Brown, E. T. (Ed). 1981. *Rock Characterization, Testing and Monitoring: ISRM Suggested Methods*. Oxford, Pergamon, 211 p.
- Deere, D. 1963. Technical description of rock cores for engineering purposes. – *Felsmechanik und Ingenieurgeologie*, 1, 1, 16–22.
- Deere, D., R. Miller. 1966. *Engineering Classification and Index Properties for Intact Rock*. Tech. Report No AFWL-

- TR-65-116, Air Force Weapons Lab., Kirtland Air Base, New Mexico, 105 p.
- Deere, D., D. Deere. 1988. The rock quality designation (RQD) in practice. – In: Kirkaldie, L. (Ed.). *Rock Classification System for Engineering Purposes*. Philadelphia, ASTM STP 984, American Society for Testing and Materials, 91–101.
- Dimitrov, I., I. Vasilev. 2010a. Method for evaluation of fracture density in variously oriented rock slopes. – *Proceedings of the IVth International Geomechanics Conference*, 3–6 June 2010, Varna, Bulgaria, 356–363.
- Dimitrov, I., I. Vasilev. 2010b. Genetic types of fracture systems in the Elatcite copper mine. – *Minno Delo i Geologiya J.*, 5–6, 27–31 (in Bulgarian).
- Dimitrov, I., I. Vasilev. 2011. Mine-geotechnical significance of the fracture systems in Elatsite mine. – *Minno Delo i Geologiya J.*, 1–2, 42–47 (in Bulgarian).
- Goodman, R. E. 1976. *Methods of Geological Engineering in Discontinuous Rocks*. San Francisco, West Publishing, 472 p.
- Goodman, R. E. 1989. *Introduction to Rock Mechanics, 2nd Edition*. New York, John Wiley & Sons, 289 p.
- Grimstad, E., N. Barton. 1988. Design and methods of rock support. Norwegian tunneling today. – *Norwegian Soil and Rock Engineering Association*, 5, 59–64.
- Hoek, E. 2004. *Rock Mass Classification*. Hoek's Corner. www.rocsience.com.
- Hoek, E., E. T. Brown. 1980a. *Underground Excavations in Rock*. London, Inst. Min. Metall, 527 p.
- Hoek, E., E. T. Brown. 1980b. Empirical strength criterion for rock masses. – *J. Geotech Engrg. Div., ASCE*, 106 (GT 9), 1013–1035.
- Hoek, E., E. T. Brown. 1988. “The Hoek-Brown failure criterion – a 1988 update”. – In: *Proceedings 15th Canadian Rock Mechanics Symposium*, 31–38.
- Hoek, E., E. T. Brown. 2019. The Hoek-Brown failure criterion and GSI 2018 edition. – *J. Rock Mechanics and Geotech. Eng.*, 11, 445–463.
- Hoek, E., P. G. Marinos. 2000. Predicting tunnel squeezing problems in weak heterogeneous rock masses. – *Tunnels and Tunneling International*, 32, 11, 45–51.
- Hoek, E., P. K. Kaiser, W. F. Bawden. 1995. *Support of Underground Excavations in Hard Rock*. Rotterdam, Balkema, 235 p.
- Hoek, E., P. Marinos, M. Benissi. 1998. 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. and the Environment*, 57, 2, 151–160.
- Hoek, E., C.T. Carranza-Torres, B. Corkum. 2002. “Hoek-Brown failure criterion – 2002 edition”. – In: *Proceedings of the Fifth North American Rock Mechanics Symposium*, 1, 267–273.
- Hoek, E., P. Marinos, V. Marinos. 2005. Characterization and engineering properties of tectonically undisturbed but lithologically varied sedimentary rock masses. – *Intern. J. Rock Mechanics and Mining Sciences*, 42, 2, 277–285.
- Ilov, G. 2004. *Constructional Rock Mechanics*. Sofia, ERA, 285 p. (in Bulgarian).
- ISRM. 1978. Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. – *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech., Abstr.*, 15, 319–368.
- Ivanov, I. D. 2018. Finding of the maximum shear stress on arbitrary oriented rock discontinuity in the context of the geotechnical practice of road and tunnel construction. – *Rev. Bulg. Geol. Soc.*, 79, 1–2, 59–68 (in Bulgarian with English abstract).
- Ivanov, V. 2006. Rock massif geomechanical assessment after closing of “Rosen” mine, Burgaski Medni Mini EAD. – *Ann. Univ. Mining and Geol.*, 49, 2–Mining and Mineral Processing, 58–65 (in Bulgarian with English abstract).
- Lakov, A. 2018. *Rock Slopes Stability in Open-pit Mines and Quarries*. PhD thesis, Sofia, University of Mining and Geology “St Ivan Rilski”, 138 p. (in Bulgarian, unpublished).
- Lakov, A., S. Stoynev. 2013. Defining Hoek and Brown failure criterion for rocks from simple strength laboratory tests data. – In: *Proceedings of the XII National Conference of the Open Pit and Underground Mining of Minerals*. 26–30 June 2013, Varna, Bulgaria, 218–225.
- Lomtadze, V. D. 1970. *Engineering Geology. Engineering Petrology*. Leningrad, Nedra, 527 p. (in Russian).
- Marinos, P., E. Hoek. 2001. Estimating the geotechnical properties of heterogeneous rock masses such as flysch. – *Bull. Eng. Geol. and the Environment*, 60, 2, 85–92.
- Marinos, V., P., Marinos, E. Hoek. 2005. The geological strength index: applications and limitations. – *Bull. Eng. Geol. and the Environment*, 64, 1, 55–65.
- Mitev, I. 2018. Conceptual issues in numerical modeling of underground tunnel under a new Austrian tunnel method. – *Minno Delo i Geologiya J.*, 7–8, 36–41 (in Bulgarian with English abstract).
- Mitev, I. 2019. *Numerical Model for Dimensioning and Excavation of Underground Openings*. Sofia, Comers EOOD, 142 p. (in Bulgarian).
- Palmstrom, A. 1974. *Characterization of Jointing Density and the Quality of Rock Masses Internal Report*. A. B. Berdal, Norway, 26 p. (in Norwegian).
- Palmstrom, A. 2005. Measurements of and correlations between block size and rock quality designation (RQD). – *Tunnels and Underground Space Technology*, 20, 362–377.
- Palmstrom, A., E. Broch. 2006. Use and misuse of rock mass classification systems with particular reference to the Q-system. – *Tunnels and Underground Space Technology*, 21, 575–593.
- Rehman, H., W. Wahid Ali, A. Naji, A. Jung-Joo Kim, R. Abdullah, H. Yoo. 2018. Review of rock-mass rating and tunneling quality index systems for tunnel design: development, refinement, application and limitation. – *Applied Science*, 8, 1–27.
- Romana, M., R. Tomás, J. B. Serón. 2015. Slope Mass Rating (SMR) geomechanics classification: thirty years review. – In: *ISRM Congress 2015, Proceedings of International Symposium on Rock Mechanics*. Quebec, Canada. 10–13 May 2015, 10 p.
- Sjoberg, J. 1997. *Estimating Rock Mass Strength Using the Hoek-Brown Failure Criterion and Rock Mass Classification. Internal Report BM 1997:02*. Lulea University of Technology, Division of Rock Mechanics, Sweden, 61 p.
- Talobre, J. 1957. *La mécanique des roches*. Paris, Dunod, 444 p.
- Terzaghi, K. 1946. Rock defects and loads on tunnel supports. – In: Proctor, R. V., T. L. White (Eds). *Rock Tunneling with Steel Supports*. Youngstown, Commercial Shearing and Stamping Company, 17–99.

Постъпила на 03.01.2020 г., приета за печат на 10.04.2020 г.
Отговорен редактор Пламен Иванов