

A SPECIAL CASE OF MECHANICAL INSTABILITY IN THE NORTHERN SLOPE OF THE RILA MOUNTAIN IN SOUTHEAST BULGARIA. DESCRIPTION OF THE PROCESSES AND SOCIAL SIGNIFICANCE

Ivan Dimitrov Ivanov, Dimitar Sachkov

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia, Bulgaria; E-mail: ivan.d.ivanov@mgu.bg

ABSTRACT. The Bistritsa River in the Dupnitsa district, Southwest Bulgaria, supplies potable water for 20 settlements. The potable water is diverted from the river in a narrow gorge south of the village of Bistrica. The gorge is situated in fresh gneisses with significant strength and elasticity. Due to the elastic relaxation of the rock mass and tectonic stresses, joints of very unfavorable orientation for the overall stability of the slope have been developed. The general slope is around 35° but locally it is much steeper or vertical. On the other hand, the joint friction in the gneisses varies between 23° in wet conditions and around 29° in dry conditions, so this slope is naturally unstable. Toppling, wedge sliding, and sliding on a singular plane all act on this slope simultaneously. A geotechnical solution for the protection of the water catchment installation is urgently needed, yet it may be impossible to protect the facility permanently. Socially acceptable options for accident prevention or mitigation are discussed in short in this paper.

Key words: gneisses, joint friction, toppling, wedge sliding.

СПЕЦИАЛЕН СЛУЧАЙ НА МЕХАНИЧНА НЕСТАБИЛНОСТ В СЕВЕРНИЯ СКЛОН НА РИЛА ПЛАНИНА В ЮГОЗАПАДНА БЪЛГАРИЯ. ОПИСАНИЕ НА ПРОЦЕСИТЕ И СОЦИАЛНА ЗНАЧИМОСТ

Иван Димитров Иванов, Димитър Съчков

Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София

РЕЗЮМЕ. Река Бистрица в региона на Дупница, Югозападна България, снабдява 20 селища с вода за домакински цели. Чистата вода се отклонява от реката в тясно планинско ждрело, южно от село Бистрица. Ждрелото е развито в свежи гнайси със значителна якост и еластичност. Поради еластична релаксация на скалния масив и проява на тектонски напрежения в ждрелото, са развити пукнатини с крайно неблагоприятна ориентация за цялостната стабилност на скалния склон. Генералният наклон на склона е около 35°, но локално е много по-стръмен и на места – вертикален. От друга страна ъгълът на пукнатинно триене в гнайсите варира между 23° в мокро и 29° в сухо състояние така, че този склон е изцяло гравитационно нестабилен. Блоково прекатурване, плъзгане на скални клинове и плъзгане по единични планални повърхности действат едновременно в скалния масив. Конструктивно решение за защита на водозаборното съоръжение е необходимо в кратки срокове, но може да се окаже невъзможно съоръжението да се защити трайно. Социално приемливи решения на този проблем се дискутират накратко в текста.

Ключови думи: гнайси, пукнатинно триене, прекатурване, свличане на скални клинове.

Въведение

В този труд се разглежда естествен планински склон в ждрелото на река Бистрица, който е подложен в зона с комбинация от свлачищни и срутищни процеси със сезонна активизация. При направения теренен оглед се установи, че скалната разновидност, подложена на гравитационно разрушаване е мигматизиран очен гнайс с висок коефициент на еластичност – коефициент на Поасон.

Вследствие на бърза тектонска ексумация, скалният масив релаксира и в него се развиват усилия на опън (от гравитационното разтоварване), които отварят латентни пукнатини с крайно неблагоприятна ориентация, от гледна точка на гравитационните процеси на движение на масива. В подножието на склона е разположено съоръжение за захващане на питейна вода, което е заплашено от разрушаване.

Тук са разгледани геометричните предпоставки за активизация на масива и е коментирана неговата дългосрочна стабилност. При огледа бе установено, че петрографските свойства на скалните разновидности не играят значима роля за склоновите процеси, като основната им роля е в склонността да поддържат дълги и гладки пукнатини, които определят посоките на движение.

Ждрелото на река Бистрица е дълбоко и тясно, като опасността от движения на скали идва главно от източния борд, а ролята на реката е да изнася обрушения материал, като с това непрекъснато формира пространство за продължаващо обрушаване.

В този анализ се използват следните основни кинематични и геометрични критерии:

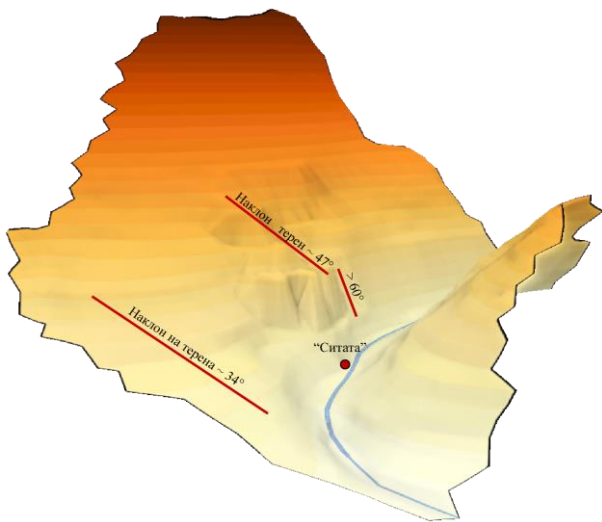
1. Ъгъл на пукнатинно триене за гнайси, който варира след омокрянето на масива.
2. Наклон и ориентация на опасният склон.

3. Ориентация на пукнатините, които разграничават призми или блокове на обрушаване и определят посоките на плъзгане и прекатурване (toppling).

Текстът е илюстриран със стереографски проекции на кинематичните фактори на стабилитета.

Ориентация и наклон на планинския склон

В изследваният участък генерализираната посока на склона е около 170° . Осредненият наклон на склона (в участъците с растителност) по данни от изготвения модел на терена е около 34° (Фиг. 1). За съжаление този ъгъл не може да се приеме актуален при оценката на риска (напр. Kumar et al. 2019) тъй като, поради наличието на полегати потъващи на запад пукнатини се формират естествени стъпала и откоси, в които наклонът се изменя от 47° до над 60° . Наблюдават се дори надвиснали участъци с обратен наклон.



Фиг. 1. Генерален наклон на планинския склон в нестабилния участък над ситовата инсталация на водоприхващането, оценен по изготвения модел на терена. Установеният ъгъл на склона е 34° , но това е генерализиран откос, за съжаление някои части от откоса са по-стръмни.

Също така, поради специфичната ориентация на пукнатините са формирани три големи улея (клинове на обрушаване), като в дъната на улеите наклонът на формираните корита е по-малък, а по ребрата между улеите наклонът на откосите е по-голям като достига до 60° . Едно такова ребро е надвиснало точно над техническите съоръжения за водохващане на питейни води и заплашва да се срути цялото и да разруши както сградата на ситовата инсталация, така и бетонните стени на водозаборните прегради.

Скално-механични процеси на дестабилизация на склона

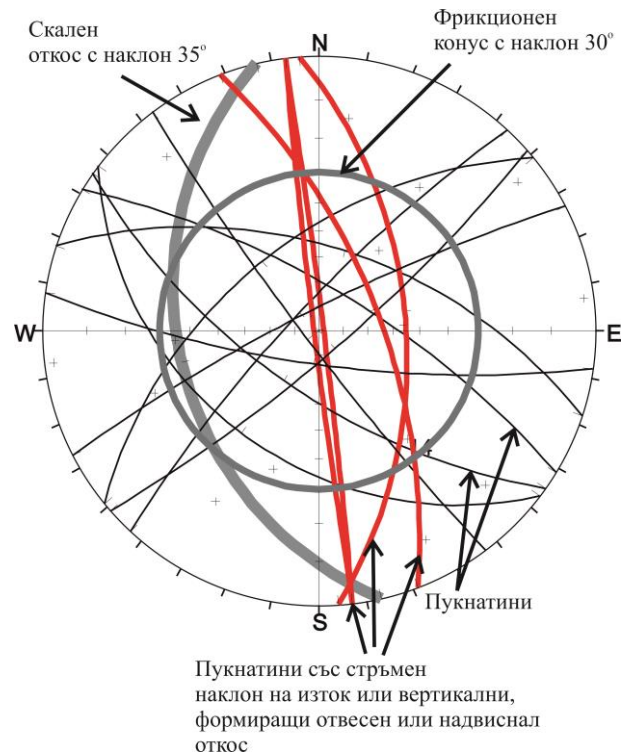
В текста по долу са описани тези процеси на механична дестабилизация, които са установени в изследваният участък и имат отношение към стабилността на откосите.

Формиране на стъпала и вертикални откоси и откоси с обратен наклон в склона

В изследваният участък се установява наличието на дълги гладки пукнатини, които са грубо паралелни на склона. Разграничават се както вертикални, така и стръмно потъващи на изток такива. По тези пукнатини се отлепват скални пластини, които създават отворени пространства и надвисване на части от склона над речната долина.

При наличието на многобройни, стръмно потъващи отворени пукнатини се създават условия за отлепване и прекатурване на скални блокове, което определя срутищен процес.

Вертикалните и надвиснали пукнатини са показани на фигура 2, като пукнатини със стръмен наклон на изток или вертикални формиращи отвесен или надвиснал откос. На същата фигура е показана като плоскост и генерализираната повърхнина на склона (daylighting) (дъга издута на запад) и останалите пукнатини водещи до блокова нестабилност, измерени около водозаборното съоръжение. С кръг около центъра е изобразен фрикционен конус, отразяващ пределния ъгъл на пукнатинно триене за гнайси в сухо състояние – който е 30° .



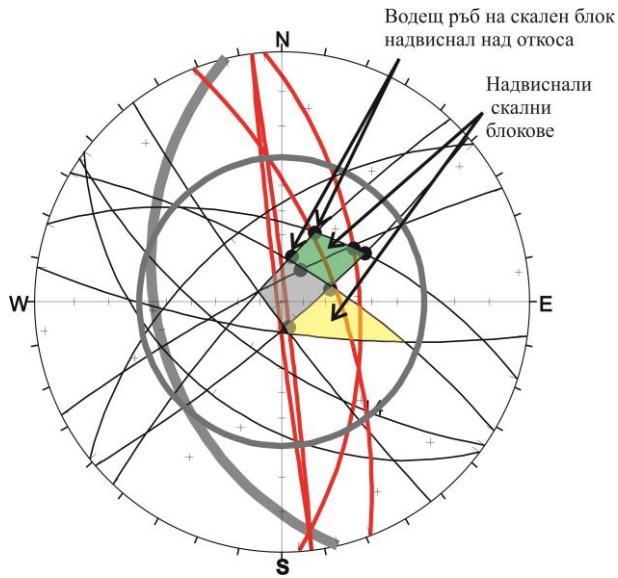
Фиг. 2. Стереограма на основните пукнатини, които водят до нестабилност на обекта. Показан е фрикционен конус с наклон 30° и генерализираната повърхнина на склона с идеализиран наклон от 35° .

Пресечниците на пукнатините представляват ръбове на скални блокове. Тези пресечници, определят формата на скалните блокове в стереографска проекция и посоките, по които се случва да се плъзгат, а също и обратният наклон на блоковете, определящ условието за прекатурване на блокове (toppling) (напр. Bray and Goodman, 1981), което е основна предпоставка за развитие на срутищен процес.

Вертикалните и потъващи на изток стръмни пукнатини са с посока почти паралелна на посоката на източния склон на долината, което показва че условия за надвисване на откоса има по целият изследван участък.

Формиране на скални блокове с обратен наклон (срещу склона), водещи до прекатурване на блокове

Наличието на вертикални или стръмно потъващи на изток пукнатини, които са паралелни на склона, създава условия за блокова нестабилност на скалния масив, тъй като ръбовете на блоковете потъват на изток (Фиг. 3). Тези блокове са неравновесни във вертикална плоскост или в надвиснала над откоса плоскост.



Фиг. 3. Формиране на скални блокове с неуравновесен център на тежестта ограничени от ръбове, потъващи на изток, които надвисват в плоскостите на стръмните пукнатини над склона. Ръбовете на блоковете са показани с точка, а сеченията на блоковете са потъмнени в различен цвят.

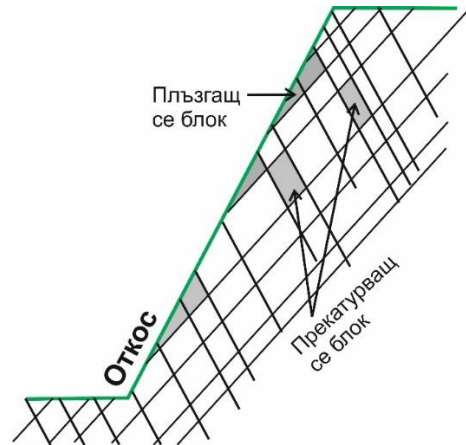
Както се вижда от пукнатините, представени на стереограмите от фигура 2 и фигура 3, надвисването на пукнатинните стени достига до около 55-60°. Тоест блоковете буквално висят над долината като при отлепването и им се създават ниши с наклон на свода 40-45° (Фиг. 4), като всяка ниша води до откъсване на блока над нея, което прави процеса на обрушаване перманентен.

Неблагоприятен е и факта, че блоковете са удължени с посока на удължението на изток. Механизмът на освобождаване на блокове е илюстриран на фигура 5.

Тази кинематична ситуация се описва в геотехническата литература (Goodman, 1989, Brau and Goodman, 1981) като „toppling“ – „прекатурване“. При нея се създава непрекъснат поток от скални блокове с различен размер. Размерът на блоковете варира според гъстотата на пукнатините и е от чакълен размер до размери с тегло до няколко метрични тона. По долината на река Бистрица повечето от блоковете са пирамиди с неправилно четириъгълно или триъгълно сечение (Фиг. 4).



Фиг. 4. Ниша, формирана от откъсването на пирамидален блок. Върхът на пирамидата се издига на изток, а основата на пирамидата потъва на запад към реката. Обемът на освободеното пространство е близо 0,5 m³, което съответства на тегло от порядъка на 1,5 Т. Вижда се гладката повърхност на пукнатината в основата на нишата.



Фиг. 5. Скица, показваща механизма на откъсване на блокове по комбинация от пукнатини, потъващи напречно на склона, паралелно на склона и срещу склона.

Формиране на плъзгане по пукнатинни ръбове – клинове на обрушаване, наклонени по посока на склона

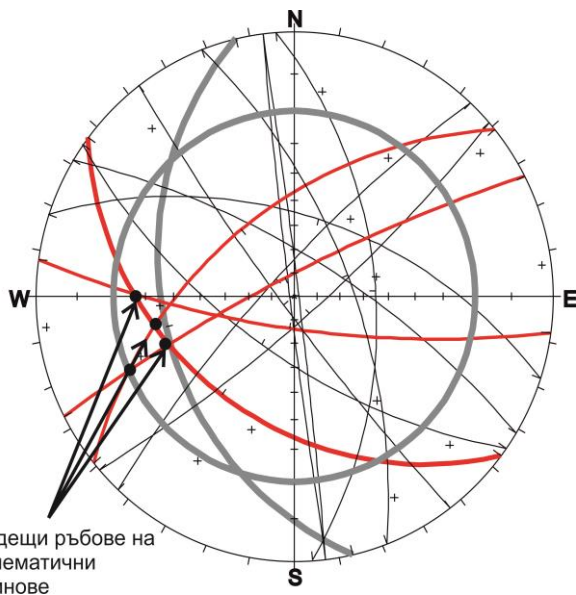
При плъзгането на големи скални клинове (с тегло стотици и хиляди тонове), което е повече или по-малко еквивалентно на свлачище, от най-голямо значение е ъгълът на пукнатинно триене и наличието на празно пространство, по посока на което да се извърши плъзгането. В случая празно пространство, необходимо за плъзгането, се създава от речната ерозия.

От различни литературни източници може да се установи, че ъгълът на пукнатинно триене за гнайси се изменя между 23° за мокри пукнатини и 29° за сухи пукнатини (Barton, 1973; Wine and Lili, 2003, и др.).

В случая с долината на река Бистрица, склонът е цялостно нестабилен в контекста на всички кинематични ситуации, тъй като генералният му наклон от 34-35° е по-голям от ъгъла на пукнатинно триене по пукнатините, развити в този склон.

На горните диаграми (Фиг. 2 и Фиг. 3) е показан оптимистичен вариант на фрикционен конус с ъгъл на пукнатинно триене от 30°, тоест сухо състояние. При фрикционен ъгъл от 30° се установява ясна кинематична нестабилност – клинове по пукнатини, потъващи на запад и на югозапад, тоест към реката.

За да изследваме склонността към формиране на кинематични клинове при неблагоприятни условия на следващата стереограма (Фиг. 6) е показан наклон на фрикционния конус от 25°. Установяват се поне четири реални кинематични клина.



Фиг. 6. Формиране на поне четири кинематични клина, маркирани с черни точки в кинематично нестабилната област на диаграмата между фрикционният конус и плоскостта на откоса.

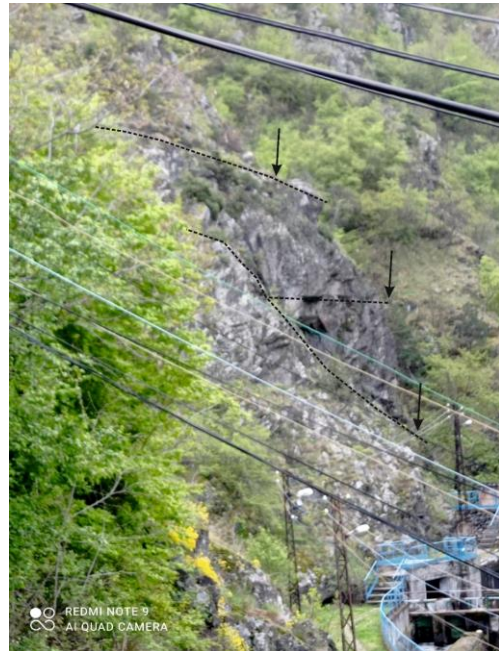
При огледа на обекта се установи, че в действителност такива кинематични клинове са вече формиращи. Тези клинове оформят три дълбоки улея, по които се придвижва блоково обрушен материал. Улеите се проследяват на десетки метри нагоре по склона.

Към момента улеите не съдържат твърде големи блокове, но е задвижено едно от ребрата на улеите (позитивната релефна форма между улеите), което представлява непосредствено задвижен блок с тегло над 10 000 тона. Този блок е освободен в горната си част от субхоризонтални до наклонени по посока на склона пукнатини, така че при обрушаване на принципа на доминото ще задвижи още по-голяма маса над този блок (Фиг. 7).

Наличие на обща ос на въртене на пукнатините – условие за формиране на голяма композитна свлачищна повърхнина на плъзгане

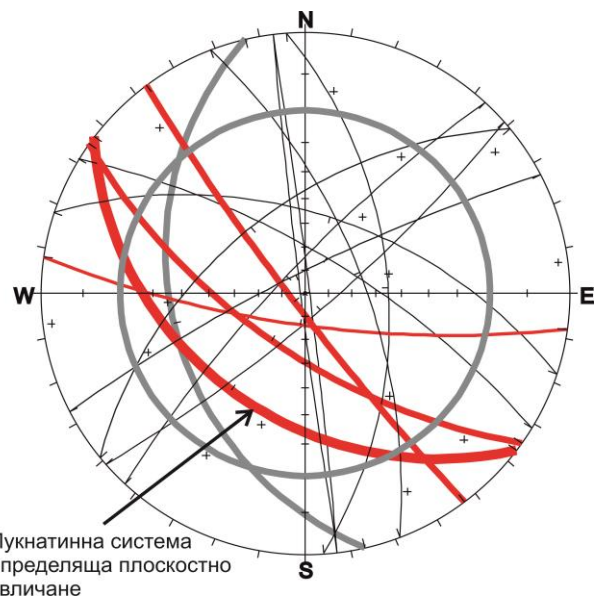
Последният анализ в това изследване е възможността да се задвижи голяма свлачищна маса по плоскост, формирана от свързване на неблагоприятно ориентирани

пукнатини. Механизмът на това движение се определя от пукнатини, които имат обща посока, която е повече или по-малко паралелна на склона и имат потъване към отвореното пространство на речната долина.



Фиг. 7. Основна стръмна пукнатина, по която се плъзга големият скален блок над ситовата инсталация и полегати пукнатини, които ще доведат до домино-ефект на разрушаване на цялото ребро нагоре по склона.

При анализа се установява една пукнатинна система, потъваща на югозапад, която има подходяща ориентация и няколко добре развити вертикални и потъващи на изток пукнатини (Фиг. 8). Тези пукнатини могат да се подредят в пространството, така че да се формира обща ос на въртене на техните плоскости.



Фиг. 8. Пукнатини, ориентирани по посока на склона, показани с червена дебела линия. Тези пукнатини благоприятстват свличане чрез „плоскостно срязване“ – „plane sliding“.

При свличане по дискутирания механизъм пукнатините се свързват като под действието на опън и срязване се разрушават скалните мостове между тях и се формира обща голяма пукнатина.

Тази пукнатина има стъпаловиден характер (стъпалата имат обща ос на въртене, и е паралелна на посоката на ждрелото), като стълбата слиза по посока на склона.

В действителност този механизъм на скална нестабилност е задвижен от скалното ребро над ситовата инсталация. Пукнатината, по която става основното движение, вече е загладена от срязването (Фиг. 9) и има много малък коефициент на пукнатинно триене.

Пукнатинното триене по никакъв начин не може да задържи скалните блокове над пукнатината, защото наклонът на пукнатините, по които става плъзгането е над 45° (много над фрикционният ъгъл в гнайсите), а локалният наклон на склона над ситовата инсталация варира между 60 и 90° , като се формира празно пространство за движение на запад.



Фиг. 9. Загладена основна плъзгателна повърхнина над ситовата инсталация.

Проблем, свързан с укрепването на нестабилния блок над ситовата инсталация

Блокът, разположен над ситовата инсталация, вече е приведен в движение и катастрофалното му самообрушаване зависи единствено от честотата на валежите, които понижават ъгъла на пукнатинно триене. Може да се приеме, че скалните прагчета и мостове, които го задържат са вече разрушени и загладени и затова обрушването се очаква в съвсем кратък период.

Обрушването ще бъде катастрофално, тъй като блокът не е цял, а е фрагментиран на големи подблокове от полегати и потъващи към долината пукнатини. При скъсване на долната част на блока, още в същият момент ще се скъсат и скалите, разделени от тези пукнатини, показани на фигура 7, а също и скалите над тях извън обхвата на фотографията. Това ще доведе до непосредствено падане на скална маса с приблизително

установено тегло от над $10\,000$ тона, а в последствие, след активиране на пукнатините нагоре по склона и много по-голяма.

За укрепването на скалния блок се анализират решения, базирани на използване на мрежи и анкери, скална обувка в основата на блока и други такива. Поради стръмният наклон на плъзгателните повърхнини и големият размер на блоковете, всички геотехнически решения са временни и несигурни.

Дори самият процес на дейности по укрепването може да активира процес на неконтролирано свличане.

В действителност склонът не може да се укрепят трайно, като постоянно решение може да се разглежда единствено преместването на водоващещото съоръжение. Преместването е възможно само след осигуряване на значително национално финансиране.

Изводи

В обхвата на изследвания обект се разграничават всички известни типове нестабилност в скални откоси, а именно:

1. Прекатурване на блокове;
2. Свличане по кинематични клинове;
3. Свличачно свличане по композитна свличачна повърхнина, изградена от свързани пукнатини.

Въпреки, че тук разглеждаме частен случай на механична нестабилност, картирана в северния склон на Рила планина, такива ситуации се отчитат и на други места в България.

Изграждането на различни технически съоръжения в миналото много често не е било съпроводено с необходимите проучвания. В повечето случаи, въпреки нуждата от детайлни изследвания за даден социално значим обект, е използвана обобщена информация за повечето параметри и е акцентирано само върху най-важния. В разглеждания обект това е било количеството и качеството на водата, която ще бъде експлоатирана, но не и заобикалящата я среда.

В същото време едно по-сериозно изследване би показало, че е нецелесъобразно реализирането на този проект на това място. С по-голям успех инсталациите можеха да бъдат изградени не на десния, а на левия бряг на реката, който очевидно е по-устойчив, а в най-добрия случай по-надолу по течението извън тясното ждрело.

Поради изцяло нестабилният склон, гравитационната сила ще работи винаги и при всички обстоятелства за разрушаването на това съоръжение. Поддръжката на съоръжението ще надхвърли финансовите възможности на местните общности.

Изхождайки от частния случай, за минимизиране на непредвидените разходи и избягване на разнообразни проблеми, свързани и с други инженерни съоръжения смятаме, че:

– в нормативната уредба, следва да се създаде и регулира работата на специална програма за финансиране на постоянно обследване на вече съществуващи, значими стопански обекти в национален мащаб;

– чрез законови промени следва да се засилят изискванията за детайлно изследване на новостроящите

се обекти, което ще даде възможност за спестяване на значителни средства за поддръжка.

Литература

Barton, N., 1973. *Review of a new shear-strength criterion for rock joints*. – Eng. Geol., 7, 287–332.

Goodman, R.E. 1989. *Introduction to Rock Mechanics* – 2nd edition. – Toronto: John Wiley & Sons, 562p.

Kumar S., Nagendran, Mohd Ashraf Mohamad Ismail*, Wen Yan Tung 2019. Integration of UAV photogrammetry and kinematic analysis for rock slope stability assessment. – *Bulletin of the Geological Society of Malaysia, Volume 67*, June 2019, 105–111.

Bray, J.W., R. E. Goodman. 1981. The theory of base friction models. – *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, 18 (1981), 453-468, 10.1016/0148-9062(81)90510-6

Wines, D. R., P. A. Lilly. 2003. Estimates of rock joint shear strength in part of the Fimiston open pit operation in Western Australia. – *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 40, 929–937