

ГЕОМЕХАНИЧНА ОЦЕНКА НА УСТОЙЧИВОСТТА НА МАСИВА В РАЙОНА НА ЛИКВИДИРАН ПОДЗЕМЕН РУДНИК "СЕСЛАВЦИ" НА БУХОВСКОТО РУДНО ПОЛЕ

Венцислав Иванов

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

РЕЗЮМЕ. Извършена е геомеханична оценка на състоянието на системата Вместващ масив/Подземни изработки на ликвидирания подземен рудник "Сеславци", от Буховското рудно поле. Изследвани и определени са генотипа на съвременното естествено поле на напрежения, разпределението му и рудничното поле е районирано по напрегнато състояние. Извършена е характеризация на масива по физикомеханични и структурни характеристики чрез класификационните системи RMR и Q и са определени механизмите на разрушаване на масива. Предложена е идентификация на рисковите фактори и е оценен обусловения за системата геомеханичен риск, въз основа на който са направени препоръки и заключения.

GEOMECHANICAL ASSESSMENT OF THE COMPETENCE OF THE ROCK MASS IN THE VICINITY OF SESLAVTSI ABANDONED UNDERGROUND MINE IN THE BUHOVO ORE FIELD

Ventsislav Ivanov

University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia

ABSTRACT. A geomechanical assessment of the condition of the system host mass/underground workings of SESLAVTSI abandoned underground mine in the BUHOVO ore field is made. The genotype of the current natural stress field and its distribution have been researched and determined, and the ore field is zoned according to the stress condition. A characterization of the mass according to the physical and mechanical, and structural properties by the classification systems RMR and Q is made and the mechanisms of the mass failure are determined. An identification of the risky factors is suggested and the conditioned geomechanical risk for the system is assessed. On the basis of that are made recommendations and conclusions.

Увод

Урановото находище "Сеславци" е на 25 km на Североизток от гр. София. То е с размери 1 x 5 km и се намира в Северозападната част на Буховското рудно поле. В находището са обособени три участъка – I^{вм} западен, II^{вм} централен и III^{вм} източен. През периода на експлоатация са добити 5,027 хиляди тона руда със средно съдържание на уран 0,084 %, което представлява 28 % от производството на уран в България. Рудните залежи са на малка дълбочина. Запасите са иззети предимно чрез система със слоево изземване и последващо запълнение на добивните пространства. Находище Сеславци е обявено в ликвидация през 1994 г. по ПМС 163/1992 [1]. В заключителния етап на работата на рудника, на дълбоките хоризонти, е прилаган геотехнологичен добив, чрез излужване на отбитата и магазинирана руда, посредством сондажи.

В резултат от минните работи, концентрирани на малка площ и дълбочина, над участъците западен и източен, земната повърхност е нарушена от мощни разкъсвания.

В района, над находището, са разположени инфраструктурни, промишлени и горски обекти, чиято

безопасност изисква изучаване на създалата се геомеханична обстановка.

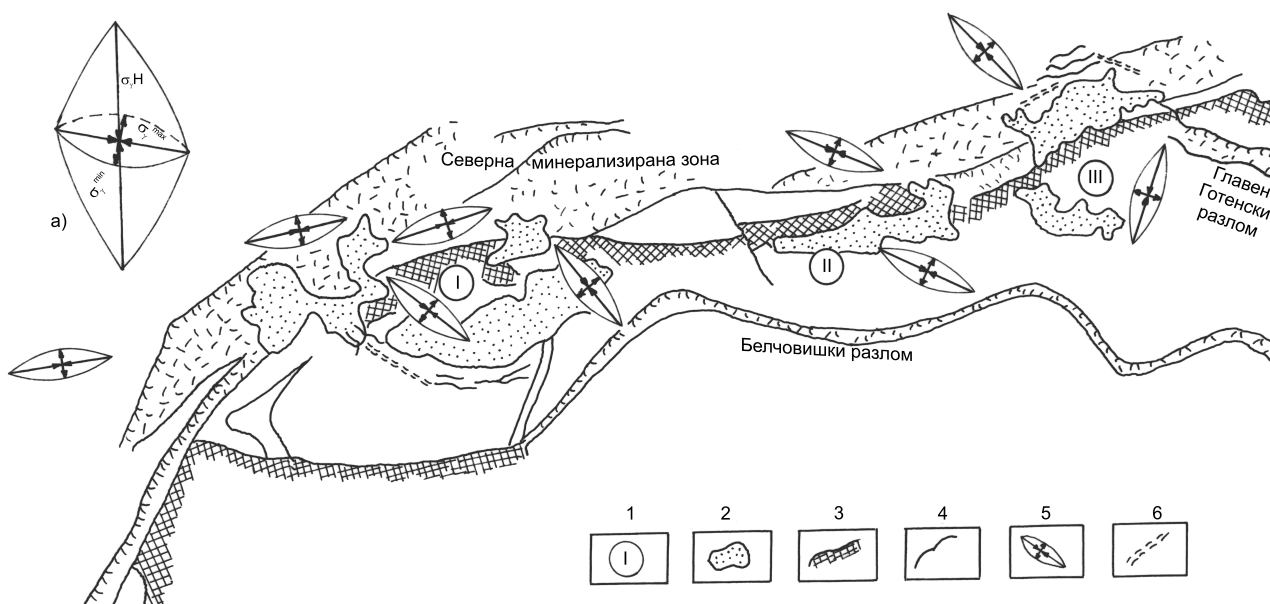
Характеристика на находището

Рудните залежи са разположени по контакта, между седиментен комплекс и внедрен в него магматичен интрузив – т.н. северна минерализирана зона (фиг. 1). Тя е със сложна форма, ограничена от север от Готенския разлом, а от юг - от Белчовишкя.

Зоната е просичана от многобройни средноамплитудни оперяващи и свързващи тектонски нарушения, които са основните рудовместващи структури. Рудните тела са от различен тип – жилни, обособени, свързани или разделени с прослойки.

Седиментният комплекс е изграден основно от шистозни скали – въглищно глинести и глинесто-песъкливи, брекчирани разновидности. Интрузивът се състои от разновидности на сиенита, кварцсиенити и граносиенити.

Вместващият масив и рудните зони, вследствие многобройните тектонски въздействия са напукани и смачкани, натрошени и изветрели.



Фиг.1. Ситуационна карта на находище «Сеславци». 1 – участък; 2 – рудно тяло; 3 – зона на контакта; 4 – съществуващи теренни разкъсвания; 5 – поле на напрежения; 6 – прогнозиран теренни разкъсвания

Подземните води са обособени в два водоносни хоризонта. Плитко циркулиращите води са пукнатинни, имат дебит 1 – 3 l/s и температура 7 – 12 °С. Дълбочинният водоносен хоризонт (250 – 300 m) е с дебит до 28 l/s и температура на водата 25 °С. Основните водоизточници са тектонските пукнатини и зоната на контакта. Подземните води се захранват основно от инфилтриращи се валежи и по-малко от подземни изворни водоизточници.

Проблем

След интензивна дългогодишна експлоатация, още преди ликвидацията, системата Вместващ масив/Подземни изработки (ВМ/ПИ) губи устойчивост и терена е нарушен от дълбоки, паралелни разкъсвания с дължина до 150 m, ширина 1 – 1,5 m и видима дълбочина 3 – 5 m (фиг. 2). В същото време, проекта за техническа рекултивация планира използването на пътно-строителна техника за строителството на междуселищната инфраструктура. Тези обстоятелства, наред с изложеното по-горе налагат настоящата геомеханична оценка на състоянието на масива.

Изследвания и анализ на геомеханичната обстановка

Изследванията са проведени в три фази:

- Изследване на напрегнатото състояние на масива;
- Изследване на свойствата на скалите и масива;
- Оценка на въздействието на прилаганата технология за добив, върху НДС на системата ВМ/ПИ.

А. Естествено напрегнато състояние на масива. Най-точна картина на разпределението на магнитудите и ориентацията на компонентите на природното поле на напрежения в находището може да бъде получена чрез *in situ* измервания. При разработването на находище «Сеславци» такива измервания не са правени.

За целите на описаното изследване са извършени две реконструкции на разпределението на природното поле. Първата реконструкция възстановява разпределението на регионалното палеополе, чрез анализ на ориентацията на 77 тектонски разлома, установени в района на находището, класирани по възраст и разпределени по рангове, според дължината им.[2]

В резултат на анализа е установено:

- Наличието на тектонски компоненти на напрежения;
- Определена е ориентацията на максималното натисково тектонско напрежение ($\sigma_{T \max}$), което е с азимут, изменял се в геоложката история: $\alpha_{\sigma_{T \max}} = 87^\circ \div 113^\circ$ съответно, минималното тектонско натисково напрежение ($\sigma_{T \min}$) е имало ориентация $\alpha_{\sigma_{T \min}} = 337^\circ \div 3^\circ$.

Получените характеристики, макар и важни за изследването, не са характеристиките на съвременното поле, тъй като полученото разпределение е онова, което напреженията са имали при възникването на разломите [3].

За определяне на конфигурацията на съвременното поле, за втората реконструкция са използвани данните от инклинометрията на проучвателните сондажи [4], разположени в района на трите участъка на находището.

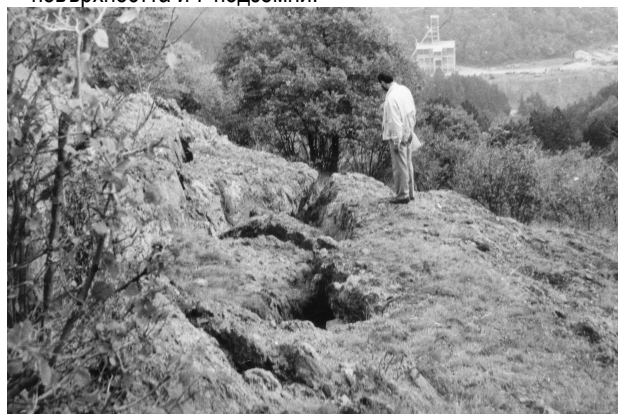
Обработени са измерванията на отклоненията на 15



а)

Фиг.2. Типични терени разкъсвания над западния и източния експлоатационни участъци

вертикално насочени сондажи – 8 прокарани от повърхността и 7 подземни.



б)

Обработката и анализът на данните (описани подробно в [3]) показва, че ориентацията на максималния тектонски натиск $\sigma_T \max$ е с направление $93^\circ - 94^\circ$. Минималния тектонски натиск $\sigma_T \min$ (относителен опън) е с посока $3^\circ - 4^\circ$. Получените резултати могат да се приемат за характеристики на съвременното природно поле на напрежения, тъй като, при прокарането на сондажите добивни работи не е имало.

Изследванията доказват съгласие между параметрите на палеополето и тези на съвременното поле. Естественото поле на напрежения е с конфигурация на елипсоид, чиято вертикална компонента се определя от гравитацията, а хоризонталните са в резултат на действащите тектонски напрежения. На фиг. 1а) е показан елипсоида на напреженията, характеризиращ естественото напрегнато състояние на масива в района на находище "Сеславци".

В хода на изследването са определени и характеристиките на естественото поле на напрежения за отделните участъци. За тази цел са обработени данните от инклинометрията на близко разположените сондажи, пресичащи зони със сходен стратиграфски строеж. Получените резултати са показани също на фиг. 1. От тях е видно, че разпределението на полетата в първи и трети участък е нехомогенно. Ориентацията на тектонските компоненти в северната и южната част на контакта са съществено различни. Вероятно това е обусловено от сложния строеж, от анизотропията и нееднородността на масива, както и от взаимодействието на тектонски оформените структурни блокове. Вторият участък от находището се характеризира с еднородно разпределение на параметрите на естественото поле. Анализите показват още, че показаното разпределение на полетата на напрежение се запазва и в дълбочина на масива, за отделните участъци.

Получените резултати позволяват районирането на находището по конфигурация на естественото поле на

напрежения. В западния участък, в северната му част вертикалната компонента достига стойност 5,6 МПа, а максималното хоризонтално напрежение е насочено субпара-

лелно. В южната част максималното вертикално напрежение достига 7 МПа, а ориентацията на максималния тектонски натиск е в посока СЗ/ЮИ. В източната част гравитационната компонента е минимална ($\sigma_{гн} = 0,5 \div 2,8$ МПа), а максималния тектонски натиск е субмеридианен, различно ориентиран спрямо контактната зона от север и юг и има определящо значение за напрегнато деформираното състояние на системата ВМ/ПИ. В централната част на находището, максималното вертикално напрежение достига около 10 МПа, а ориентацията на максималния тектонски натиск е СЗ/ЮИ и е еднородна за целия участък.

Б. Физикомеханически свойства (ФМС) на скалите и характеризация на скалния масив. Наличните данни за лабораторно определените ФМС на основните литоложки типа скали, изграждащи масива, са обобщени в таблица 1.

Таблица 1

Параметър	Обемна плътност γ , [MN/m ³]	$\sigma_{\text{н}}$ [MPa]кост на едноосов натиск	σ [MPa]кост на опън	C [MPa]кохезия,	Дълг на вътрешно триене, °
Литоложки тип					
Шисти	0,026-0,027	17 - 18	4 - 7	2 - 3	20
Сиенит	0,027 - 0,028	80 - 100	18 - 22	7 - 11	40

Лабораторните изследвания са установили, че якостните свойства на представените разновидности силно

зависят от водата. Те намаляват с $25 \pm 50\%$ за сиенитите и шистите съответно, във водонапито състояние.

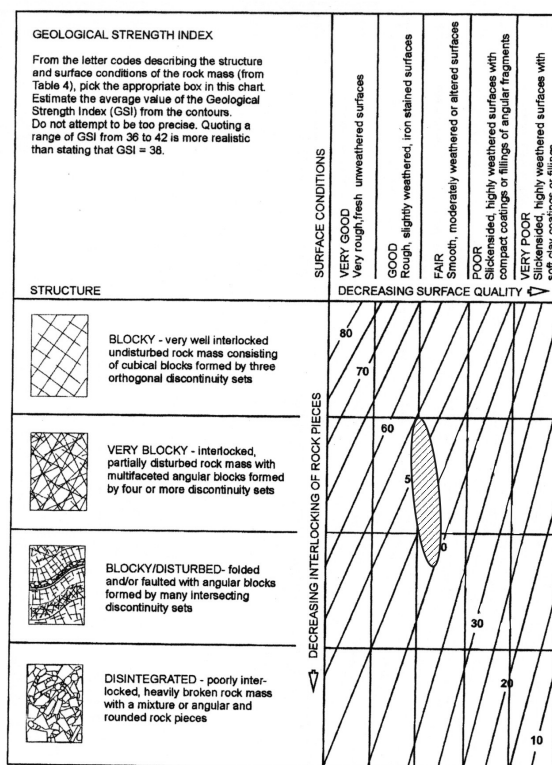
По геоложки данни, масивът е изграден от слаби, тектонски обработени, хидротермално изменени и изветрели скали. Данните за напуканост отнасят масива към III – IV категория [2] – средно до силно нарушен, с блокова структура и ниска тангенциална якост по пукнатините и междублоковите контакти [5, 6].

Структурните характеристики на масива са определени чрез геомеханичните системи за класификация. Използвани са RMR класификацията на Bieniawski [7] и Q системата на Barton [8]. Получените резултати по първата класификационна система определят общо масива от III " клас (RMR =55 – 61 %). Приложена за оценка на сервизните изработки, при използваните сечения, загубата на устойчивост на незакрепена изработка ще е между първия и втория месец. По втората система, полученият индекс на "качеството" на масива е $Q = 2,83$ (лош масив). Системата препоръчва задължително крепене на изработките [3].

Резултатите показват, че и чрез двете най-използвани в практиката схеми за характеризация на структурните свойства на скалите, нивото на геомеханичната устойчивост на вместващия масив е от задоволително до ниско [7, 3, 8].

Параметрите за качеството на масива, заедно с данните за лабораторните изследвания на ФМС на основните, изграждащи го типове скали, са използвани за определяне условията за загуба на устойчивостта на масива, в зависимост от неговата нарушеност. Най-подходящ в случая е критерият на Hoek – Brown [9]. За целта е използвана класификационната схема RMR⁸⁹ и въведения от Hoek параметър GSI (геоложки индекс на якост), даващ връзката между ФМС и структурните свойства на реалния масив [10].

Зависимостта между RMR и GSI индекса за разновидностите шисти и сиенитите е показана на фиг. 3 [9], чрез маркировката на диапазоните им на изменение.



Фиг.3 Диапазон на изменение на GSI индекса за основните видове скали на находище "Сеславци".

Критерия на Hoek – Brown, свързващ максималното (σ_1) и минималното (σ_3) главни напрежения при разрушаване на масива, имащ якост на едноосов натиск σ_c :

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m_b \sigma_3 \sigma_c + S \sigma_c^2} \quad (1)$$

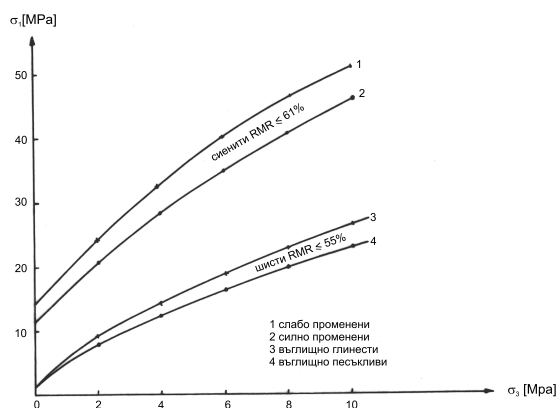
където: m_b - константа на Hoek – Brown за всеки литоложки тип скала;
 S - константа на Hoek, зависеща от структурните свойства на масива

Изчисляването на m_b и S е на база RMR:

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{RMR - 100}{28}\right)$$

$$S = \exp\left(\frac{RMR - 100}{9}\right)$$

Горните зависимости и получените резултати са използвани за построяване на графиките на закона за разрушаване на масива за слабите (шистите), и здравите (сиенитите) скали, изграждащи вместващия комплекс. Резултатите са показани на фиг. 4.



Фиг.4. Критерии на Hoek – Brown за разрушаване на масива в зависимост от ФМС и структурните особености на скалите, изграждащи масива в находището

Резултантните обвиващи на критерия на Hoek – Brown за обхвата на изменение на показателите на масива показват, че основният фактор за разрушаване и загуба на устойчивост са неговите структурни свойства. И двете групи обвиващи имат сходен характер на развитие, което означава, че якостта на ненарушените скали определя само местоположението им в напреженовата скала на паспорта на якост[15].

В. Ефекти от технологичните въздействия. Най-характерното при оценката на последиците от прилаганата технология е, че един природно силно нарушен, с ниски якостни и структурни характеристики, малък обем (дължина 5 km, ширина 1 km и височина 250 – 300 m) масив, е просечен от изключително гъста мрежа добивни и сервисни изработки. Само капиталните изработки в находището са над 120, с обща линейна дължина надхвърляща 500 km.

Добивните пространства са с размери съизмерими с дълбочината им на залагане, като някои от тях, в проблемните участъци, се припокриват във височина.

Земната повърхност, в южната зона на първи участък и в северната на трети, са в условията на пълно подработване. Една съществена част от обслужващите минни изработки (~ 60 %) са с неблагоприятна ориентация, относно направлението на максималното хоризонтално (тектонско) напрежение.

Прилаганата технология, подработването и малката дълбочина на минните работи обуславят интензивно деформиране на горележащите скали.

Процесите на движение не са плавни и се създават условия за разкъсването на терена, над добивните участъци I и II. Силно нарушеният и отслабен масив обуславя малки ъгли на движение с висока амплитуда и

кратък период на развитието им [5, 11]. Използваното сухо скално запълнение е с високи компресионни свойства и слягането му достига до 25 %. За осигуряване на работата му по поддържане на изетите пространства е необходим стабилен контакт с горележащите скали, което е трудно осъществимо при специфичните минно-технически условия в находището. Запълнението е добивано от вътрешни кариери, с което в масива са образувани допълнителни открити пространства.

Влиянието на плитко заложени добивни пространства, в условията на тектонско поле върху устойчивостта на масива е изследвано обстойно в [12]. Приложен към находище “Сеславци” за участъци 1 и 3, цитирания подход, при отношения дълбочина/размер на добивните пространства ($0,2 < H/L \leq 1$), обуславя концентрация на напреженията в стените на изработките ($k_c = 2,2 \div 2,5$) и горницето ($k_r = 1,25 \div 1,5$) както и условия за поява на опънни напрежения в него [12].

Всичко изложено тук, наред с установените характеристики на свойствата на вместващия масив и тектонския тип естествено поле на напрежения, във взаимодействието си, предпоставят наблюдаваната загуба на устойчивост на системата ВМ/ПИ, развила се до земната повърхност. В детайлна прогноза [3], за създадената в находището геомеханична обстановка, е оценена вероятността за продължаващо развитие на опасни геомеханични процеси. Впоследствие прогнозата е верифицирана и потвърдена, в един къс период след изготвянето ѝ.

Г. Оценка на геомеханичния риск. Факторите обуславящи геомеханичния риск, условията за неговото настъпване и последиците му са много, разнородни и с различен формат. По тези причини, подходите прилагани за оценката на геомеханичния риск са основно феноменологични [14, 10]. Когато се анализира геомеханичното състояние на ликвидиран подземен рудник, проблема се усложнява значително поради следните особености:

- НДС на системата ВМ/ПИ и развиващите геомеханични процеси на ликвидиран подземен рудник се определят единствено под въздействието на неконтролируеми и неуправляеми вътрешни и външни фактори;
- Системата е недостъпна за преки измервания и наблюдения, чрез които да се получи актуална количествена информация за нейния геомеханичен статус и нивото ѝ на устойчивост.

По тези причини, на база изложените анализи, тук е предложена една качествена оценка на геомеханичния риск за ликвидирания рудник “Сеславци”. За целта са идентифицирани и приоритизирани главните рискови фактори и техните вероятни последици за отделните участъци от находището. Резултатите от този анализ са представени в таблица 2.

Таблица 2.

Класификация на геомеханичен риск за системата ВМ/ПИ на находище "Сеславци"

Участък	Опасност	Идентификация на приоритетните рискови фактори	Последици	Категория на геомеханичен риск
1	2	3	4	5
II ^а ЗАПАДЕН	Загуба на устойчивост с прояви на увреждане на земната повърхност	- НДС от тектонски генотип с нехомогенно разпределение; - Массив с разуплътнена блокова структура и стръмнотезадащи контакти, нарушен от средно и нискоамплитудна напуканост, ниска тангенциална якост на пукнатините и междублоковите контакти. Изграждащи скали със силно отличаващи се ФМС. Ниска якост на монолита, зависима от подземните води, акумулиращи се в изработките $RMR \approx 55$; - Механизъм на разрушаване – структурни придвижвания на подсечени блокове; - Най-голям обем интензивна и несистемна експлоатация; сложна, гъста мрежа от плиткозаложи добивни и сервисни изработки с отношение $H/L \leq 1$, припокриващи се във вертикала неблагоприятни натоварвания и поява на концентрации на индуцирани напрежения; -реализирани разкъсвания на земната повърхност.	Нови и свързващи (съществуващите) разкъсвания, ориентирани в посока СЗ-ЮИ	Висок (потенциал за неколкратно настъпване на събитие в 5 г. период [14])

Продължение на Таблица 2.

1	2	3	4	5
II ^а ЦЕНТРАЛЕН	Загуба на устойчивост с прояви на увреждане на земната повърхност	- НДС от тектонски генотип, хомогенно разпределение; - по слабо променен масив; по-малко напукан; с по-малко тектонски нарушения; с най-добри характеристики $RMR = 61$; взаимно заключени структури; - по-проста конфигурация на мрежата сервисни и добивни изработки, заложи на най-голяма дълбочина $H/L \geq 1$; - механизъм на разрушаване от превишаване на якост в дълбочина и структурни придвижвания в горните хоризонти; - няма разкъсвания на повърхността.	Постепенни слягания и образуване на мулди, разкъсвания – малко вероятни.	Нисък
III ^а ИЗТОЧЕН	Загуба на устойчивост с прояви на увреждане на земната повърхност	-Тектонско НДС с нехомогенно разпределение, с определящо влияние на хоризонталните компоненти; -най-слаб, блоково-слоист, нарушен и променен масив, силно зависим от инфилтрацията на подземните води $RMR \leq 55$ % (на места 50-52 %) нарушени коренни скали; -добивните пространства почти достигат повърхността $H/L < 0,2$, гъста мрежа изработки с неблагоприятна ориентация спрямо $\sigma_T \max$; -механизъм на разрушаване от структурни придвижвания; -реализирани разкъсвания на земната повърхност.	Нови оконтуряващи протяжни разкъсвания на терена и внезапни провалявания в северната част	Много висок (потенциал за настъпване – веднъж годишно [14]).

Заключение

1. В резултат на съчетаване на специфични геоложки, геомеханични, миннотехнически условия и 45-годишна интензивна експлоатация, концентрирана в тясно ограничен обем скален масив, системата Вместващ масив/Подземни изработки е загубила устойчивост и са реализирани опасни геомеханични процеси, нарушаващи земната повърхност над западния и източен участък на рудник "Сеславци"
2. Идентифицираните рискови фактори и механизми на разрушаване обуславят геомеханичен риск, чиято категория и време на настъпване, след ликвидацията, се определят единствено от неконтролируеми и неуправляеми вътрешни и външни, за вече неустойчивата система, условия и явления.

3. При формираната сложна геомеханична ситуация, притежаваща потенциал за неблагоприятно развитие, проектите за техническа рекултивация и строителство, към времето на настоящия анализ, са неприложими.
4. Въз основа на геомеханичната оценка е препоръчително опасните зони да бъдат обозначени и обезопасени, и на територията им да се организират маркшайдерски наблюдения, за установяване на характера и етапа на процесите на движение на подработените части от земната повърхност.

Литература

1. ПМС № 163/1992 Г. за прекратяване на уранодобивната дейност в Република България и нейното ликвидиране
2. Козырев А. Геомеханическое обеспечение разработки месторождения Кольского полуострова, Апатиты, 1989
3. Ivanov V., Assenov D. "Geomechanical prognosis of the state of the massif in an Abandoned Underground Mine from Enviromental Protection point of view", Yugoslav Conference with International Participants, Proceedings, Belgrade, 1996
4. Способ определения направлений главных тектонических напряжений в массиве горных пород, АС № 1208237, СССР, 1987 г.
5. Турчанинов И. А. Основы механики горных пород, Недра, 1989
6. Rock Characterisation Testing and Monitoring ISRM, Suggested Methods, Pergamon, 1981
7. Bienjawski Z. T. Engineering Rock mass classifications, NY, Wiley, 1989
8. Barton et al Application of the Q-system in design decisions NY, Pergamon, 1980
9. Hoek E. Streugth of Rock and Rock Masses, Int J. of Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr. 14.255.279
10. Hoek E. Rock Engineering, 2001
11. Турчанинов И. А. Тектонические напряжения в земной коре и устойчивость горных выработок, Л. Наука, 1978
12. Марков Г. А. О распределении горизонтальных тектонических напряжений в близи поверхности в зонах поднятия земной коры , ФТПРПИ, N5, 1975
13. Иванов В. Методология за геомеханична оценка на състоянието на масива при ликвидиране подземни рудници, Сборник доклади Международна конференция "Ролята на геомеханиката за устойчиво развитие на минната индустрия", 2007, Несебър, България.
14. Стандарт по управление на риска, FERMA, 2003, IRM, CE
15. Hudson J. R. "Atlas of Rock Engineering Mechanisms: Underground Exavations", Int J. of Rock Mech & Geomech Abstr. Vol 28, № 6, 1991

Препоръчана за публикуване от
Катедра "Подземно разработване на полезни изкопаеми", МТФ