



РЕЗУЛТАТИ И АНАЛИЗ ОТ ПРАКТИЧЕСКАТА РЕАЛИЗАЦИЯ НА СИСТЕМА ЗА АВТОМАТИЗИРАН МОНИТОРИНГ

инж. Ясен Прокопов, проф. Станислав Топалов, инж. Николай Панчовски, инж. Боряна Бенова
jasen_prokopov@abv.bg, stopalov@gmail.com, nikolaipanchovski@asarel.com, boby_benova@abv.bg

RESULTS AND ANALYSIS OF THE AUTOMATED MONITORING SYSTEM APPLIED IN ASSAREL OPEN PIT MINE

eng. Yasen Prokopov, prof. Stanislav Topalov, eng. Hikalai Panchovski, eng. Boryana Benova
jasen_prokopov@abv.bg

ABSTRACT

The installed developed system for automated monitoring and management of the Assarel - Medet mine slope stability provides continuous spatial information about the boards condition and the spatial position of specially placed benchmarks. The analysis of the primary data and the results of their processing substantiates specific conclusions regarding their use in interpretations and conclusions. The impact of blasting works, atmospheric conditions and seasonal changes, and the instrumental measurements quality were assessed.

Key words: slope stability, geodetic measurements, deformation determination, analysis

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Планът за мониторинг и управление на откосите на рудник “Асарел - Медет” е изготвен съгласно предварително задание и определени допускания и специфична налична информация. Проучването за проектиране на рудника [3] е на база геотехнически данни, като нерядко за минно-геоложките условия е характерна появата към даден момент, за даден участък, на неопределеност и локални условия, които могат да доведат до нарушаване стабилитета на откосите и необходимост от управлението му по време на добивните работи. Тези локални условия могат да бъдат свързани с якостта на скалите, разположението и ориентацията на контактните зони, зоните на срязване и неблагоприятното въздействие на подземните води.

Програмата за мониторинг се състои от няколко системи за мониторинг на стабилитета на откосите на рудника, на взриво-сеизмичните вибрации, на налягането в порите и на слягането при дрениране на подземните води. Разглежданата технология за автоматизиран мониторинг се отнася до първата система, касаеща устойчивостта на откосите.

2. ИДЕНТИФИЦИРАНЕ НА ВЪЗМОЖНИ ЗОНИ НА НЕСТАБИЛНОСТ И ГЕОЛОЖКА СТРУКТУРА

Първостепенна задача при мониторинга е да бъдат идентифицирани потенциалните зони на нестабилност, при които залягането, напластяванията и зоните на прекъсване в разломите са неблагоприятни или зоните със слаби скали и високо порово налягане.

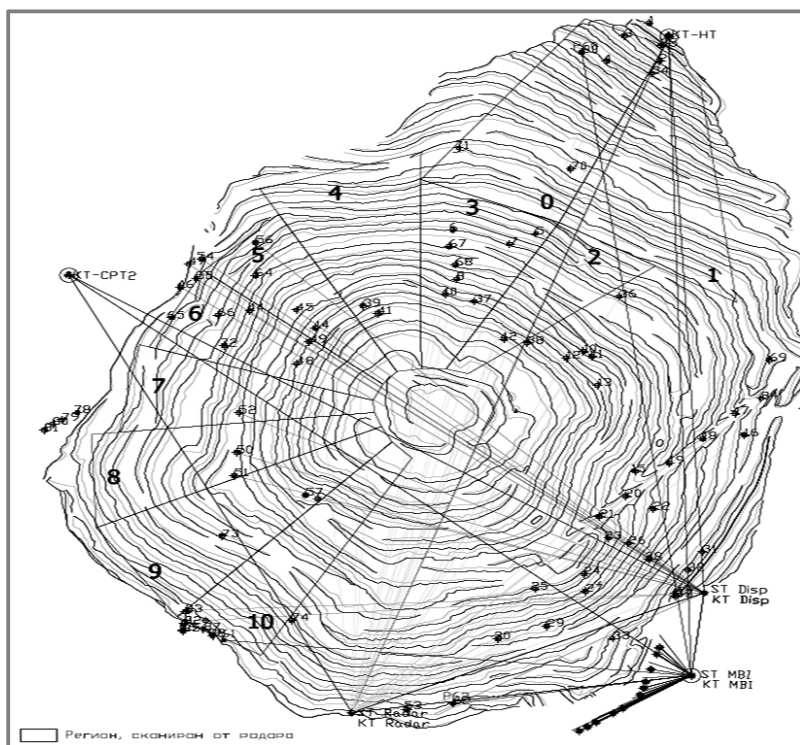
Особено важна е необходимостта от достатъчно прецизно и оптималното предварително разпределение на геодезическите точки и пиезометрите, за да могат да бъдат “покрити” всички зони с очевидна нестабилност, без да има загуба на информация (за премествания в по-ранен етап).

Измерването на *повърхностни премествания* може да бъде осъществено с най-елементарни средства – картиране на пукнатини на напрежение, чрез екстензометри или наклонометри, особено при вертикални премествания в пукнатините на напрежение. **Най-удачен** обаче е непрекъснатия мониторинг с помощта на радарна или геодезическа система, тъй като последната осигурява детайлна



хронологична информация за посоката и скоростта на преместване в нестабилната зона. Необходимо е да се използват **няколко метода**, защото сам по себе си, никой от тях не дава пълна картина.

Разположението на реперите, наблюденията за които са обект на обработка и анализ е показано на фиг. 1. Крайните призми като правило са разположени извън вероятната зона на нестабилност, за да се извършват проверки за нейното евентуално разширяване. Дадени са и местата на роботизираните тотални станции (ST Radar и ST MBI – жълто и виолетово), оборудвани с ГНСС приемници. Секторите, на които е разделен котлована на рудника съответстват на зоните, покривани от двата линейни радара и са съобразени с наклона на откосите.

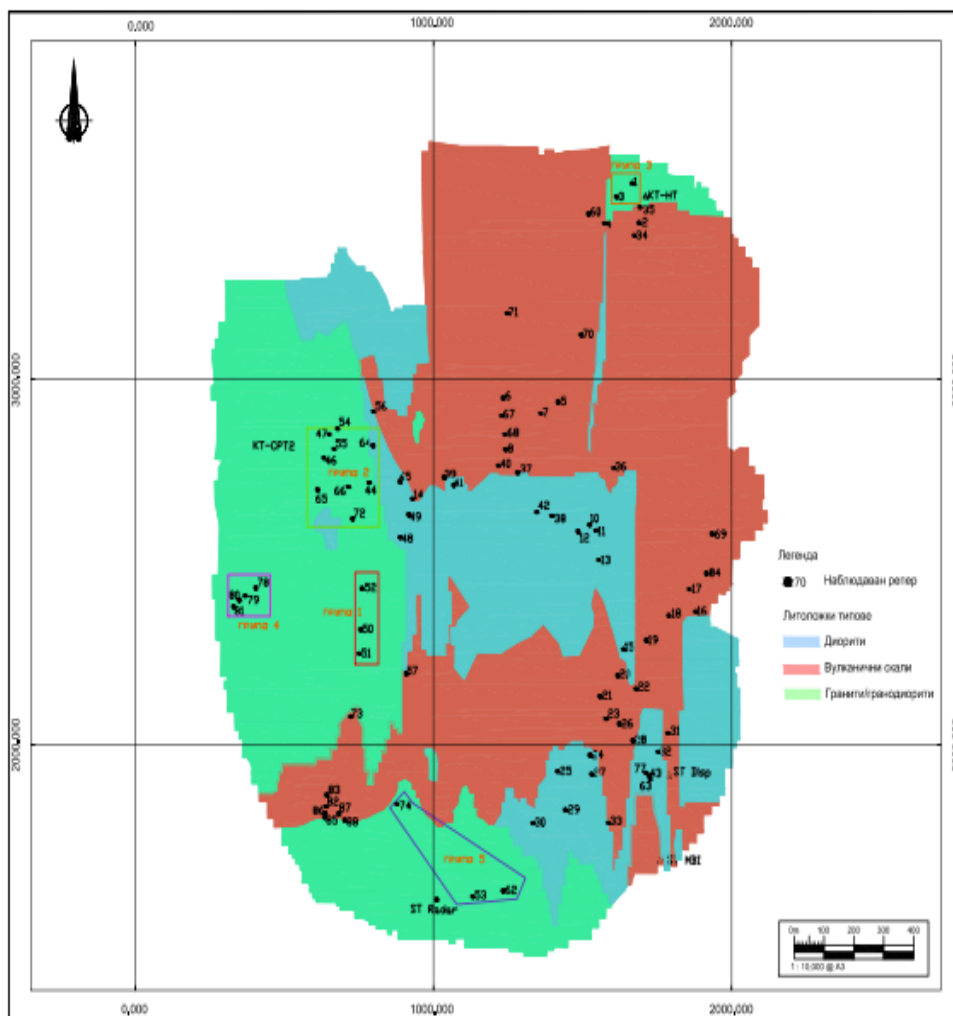


фиг. 1

Величината на нестабилност под повърхността има пряко отношение към вектора на повърхностните премествания. Установяването на такива *подповърхностни премествания* се извършва с по-просто или усъвършенствано оборудване. Такива са срезните ленти, които откриват само мястото на прекъсване в сондажите, рефлектометрията във времевата област, екстензометрите в сондажите, показващи деформации успоредно на сондажа, инклинометрите, измерващи ъгловото отклонение, както и дълбочинните трикоординатни датчици, чрез които може да се представи формата на масива [4]. Пиезометричното налягане може да се използва за управление на стабилността на откосите с удълбаването на рудника.

Геоложката структура на находището е съставена предимно от палеозойски гранити и екструзивни вулканични скали. Рудното тяло е свързано с наличието на множество разломи с основна посока север-юг и изток-запад. Наблюдават се и зони (аргилизити), които при насищане с вода имат поведение по-скоро на почва, отколкото на скала, за които се препоръчва изземване без взривяване. В обобщен вид обособяването на различни зони в рудника, според геоложките характеристики на скалите води до *три типа скали* – гранити, диорити и вулканични скали (фиг.2).

По този начин преместванията на реперите, констатирани от непрекъснатите измервания, могат да бъдат обвързани и анализирани съобразно характеристиките на скалната основа, както и да се търсят корелационни зависимости между различните зони. Това райониране (разделяне по типове скали) е в основата на последващия анализ на резултатите от геодезическите измервания.



фиг.2

3. РЕЗУЛТАТИ ОТ ОБРАБОТКАТА ПО ГЕОЛОЖКИ ЗОНИ

Една от възможните предпоставки, които имат пряко отношение към неподвижността на реперите е *здравината на скалите*, в които те са разположени. Във връзка с това по групи поотделно са обработени точките, които попадат в зоните гранити (20 репера), диорити (21 репера) и вулканични скали (41 репера).

Като допълнителни фактори са отчетени влиянието на *вертикалната рефракция* и *взривните работи*, които са специфични за всеки открит рудник. Стръмните визури, особено към близко разположените до двете тотални станции точки, при съществени температурни промени (особено сутрин) са чувствителни към непостоянния коефициент на рефракция, което налага и отчитането на този фактор.

Затова обработката освен за непрекъснатите 24-часови измервания в трите зони е извършена и отделно за времеви интервал от 6⁰⁰ до 9⁰⁰ часа. Взривните работи в рудника се извършват два пъти седмично в часовете от 14⁰⁰ до 16⁰⁰. Макар и значително по-малко на брой, измерванията в този часови интервал са обработени също отделно.

Анализът показва, че доста често липсват резултати за някои от точките, особено за по ниско разположените, поради наличие на мъгла, дъжд или сняг през зимните месеци. Общия брой налични измервания, които са използвани е показан в табл. 1.



табл. 1

време показател	0÷24 h	6÷9 h	два пъти седмично 14÷16 h
гранити	60508	7046	1495
диорити	70865	8671	1716
вулканични скали	116898	14592	2803
∑ репери	248271	30309	6014

Резултатите от обработените *относителни премествания* по височина, като двумерен и като тримерен вектор, съответно за всички репери за целия период и в двата часови интервала по геоложки зони са показани в табл.2.

Абсолютните премествания на същите точки са дадени със същите показатели и със своята основна характеристика скорост на преместване [1], съответно в табл.3 при непрекъснати 24-часови наблюдения. По аналогичен начин са обработени и измерванията в интервала от 6⁰⁰ до 9⁰⁰ часа както и при извършване на взривни работи.

Допълнително като критерий за анализ на неподвижността на реперите е използвана *надморската височина на точките*. В рудник “Асарел” височината на стъпалата е 15 m, поради което условно реперите са групирани в четири височинни пояса, кратни на тази височина. Броят на измерванията във всяка група е показан в табл. 4, като отново са запазени часовите интервали, аналогични на разделянето по геоложки зони.

табл. 2

№ на зона/ репер	Оценка	0÷24 h			6÷9 h			два пъти седмично 14÷16 h		
		dH, m	2D, m	3D, m	dH, m	2D, m	3D, m	dH, m	2D, m	3D, m
Гранити	Средно \bar{x}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.001	0.000
	Мин. - x_{min}	-0.140	-0.297	-0.297	-0.068	-0.284	-0.284	-0.041	-0.188	-0.186
	Макс. - x_{max}	0.140	0.341	0.341	0.140	0.303	0.302	0.060	0.187	0.186
	Сигма - σ_x	0.000	0.000	0.000	0.000	0.032	0.032	0.000	0.032	0.032
Диорити	Средно \bar{x}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001
	Мин. - x_{min}	-0.194	-0.199	-0.211	-0.121	-0.151	-0.106	-0.027	-0.138	-0.132
	Макс. - x_{max}	0.195	0.199	0.181	0.077	0.163	0.163	0.024	0.090	0.073
	Сигма - σ_x	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Вулканични скали	Средно \bar{x}	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001
	Мин. - x_{min}	-0.328	-0.338	-0.338	-0.114	-0.307	-0.307	-0.092	-0.207	-0.207
	Макс. - x_{max}	0.138	0.325	0.436	0.087	0.276	0.275	0.074	0.209	0.209
	Сигма - σ_x	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
∑ репери	Средно \bar{x}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Мин. - x_{min}	-0.328	-0.338	-0.338	-0.121	-0.307	-0.307	-0.092	-0.207	-0.207
	Макс. - x_{max}	0.195	0.341	0.436	0.140	0.303	0.302	0.074	0.209	0.209
	Сигма - σ_x	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000



табл. 3

№ на зона/репер	Оценка	dH	2D	3D	V _{dH}	V _{2D}	V _{3D}
		m	m	m	м/ден	м/ден	м/ден
Гранити	\bar{x}	-0.048	0.178	0.220	0.000	0.113	0.153
	x_{min}	-0.813	0.000	0.000	-1.063	0.000	0.001
	x_{max}	0.391	1.420	1.575	0.814	2.856	2.863
	σ_x	0.239	0.318	0.378	0.100	0.253	0.251
Диорити	\bar{x}	0.042	0.447	0.524	0.000	0.056	0.072
	x_{min}	-1.034	0.000	0.000	-1.186	0.000	0.000
	x_{max}	0.336	1.751	2.023	0.434	1.665	1.665
	σ_x	0.300	0.523	0.540	0.055	0.145	0.148
Вулканични скали	\bar{x}	0.072	0.256	0.321	-0.002	0.097	0.125
	x_{min}	-1.126	0.000	0.000	-1.244	0.000	0.000
	x_{max}	0.397	2.801	2.878	0.816	3.705	3.761
	σ_x	0.212	0.381	0.397	0.077	0.228	0.228
Σ репери	\bar{x}	0.034	0.291	0.354	-0.001	0.088	0.114
	x_{min}	-1.126	0.000	0.000	-1.244	0.000	0.000
	x_{max}	0.397	2.801	2.878	0.816	3.705	3.761
	σ_x	0.251	0.427	0.454	0.071	0.214	0.214

табл. 4

време показател, m	0÷24 h	6÷9 h	два пъти седмично 14÷16 h
H <795	76794	9636	1879
H 795÷900	110375	13253	2890
H 900÷1005	35059	4225	686
H >1005	26043	3195	559
Σ репери	248271	30309	6014

Относителните премествания, по аналогичен на геоложките зони начин, са пресметнати отново по височина, като двумерен и като тримерен вектор. Същото се отнася и за абсолютните премествания за всичките 82 точки, в зависимост от височинния пояс, в който попадат, с техните скорости, оценени и сравнявани със статистическите характеристики \bar{x} и σ_x - за целия период, за оценка на рефракцията (сутрин 6⁰⁰-9⁰⁰ h) и при провеждане на взривни дейности (14⁰⁰-16⁰⁰ h).

Задълбоченият анализ на получените резултати [2] за относителните премествания по геоложки зони показва, че по абсолютна стойност те са най-значими при вулканичните скали, които основно са в североизточния край на рудника и в най-ниските му участъци - от порядъка на около 40 cm. Най-малки са при диоритите в дъното на котлована. Очаквано средните стойности са почти равни на 0, както и техните средни квадратни отклонения, тъй като положителните и отрицателните се компенсират съгласно едно от основните свойства на случайните грешки. Преместванията по височина са чувствително по-малки в сравнение с двумерния вектор, поради факта, че масива по принцип е устойчив, но призмите пряко се влияят от атмосферните условия.

При групирането на точките по височина се запазва същата тенденция, като максималните стойности са по-ниски, поради значително по-еднородните условия за всеки височинен пояс.

Абсолютните премествания, т.нар. *кумулятивен ефект* и при двата подхода за групиране дават значително по-разнообразна информация. Най-значими са преместванията при вулканичните скали, докато за точките с надморска височина от 900 до 1005 m те са най-малки. Най-големите



скорости на преместване и при двата критерия за групиране се наблюдават при сутрешните измервания. Това е така не защото точките са нестабилни, а заради значимото влияние на вертикалната рефракция и по-големите грешки при измерванията.

Взривните работи, които се извършват при добра организация, не влияят върху отклоненията на преместванията от средните им стойности за целия период от време. При тях негативният ефект е по-скоро от запрашаването, което пречи на добрата видимост от станциите към призмите.

Отделните значими максимални и минимални стойности, достигащи 2-3 m (такива са реперите с номера 66 в източната и 82 и 83 в югоизточната част на рудника), са резултат от технологията на изземване, при която един малък участък, където е призмата, може да се свлече, което се регистрира от непрекъснатото измерващата станция. Реално това не нарушава стабилитета на целия откос, а впоследствие призмата се премахва и евентуално се поставя нова.

По-съществени изводи и препоръки, които могат да се направят са:

- числените стойности и характеристики, като резултати от обработката потвърждават стабилитета на откосите в рудника;
- рефракцията има своето значимо влияние, особено в ранните сутрешни часове – по възможност да се пропуска часовия интервал от 5⁰⁰ до 9⁰⁰ h, или поне да не се взема предвид при обработката;
- взривните работи не са ограничаващ фактор и почти не оказват влияние върху движението на откосите - отражението е локално, а не глобално;
- окончателните заключения следва да се вземат след минимум дублиране на информацията, примерно от линейния радар.

4. КОРЕЛАЦИОНЕН АНАЛИЗ НА РЕЗУЛТАТИТЕ ОТ ИЗМЕРВАНИЯТА ПО ГРУПИ

С цел анализ на състоянието на масива, на базата на статистически данни, са избрани няколко групи точки, разположени в различни части на рудника (фиг. 2). Всички те попадат в скали от тип гранити, в близост до контактната зона с другите геоложки типове. Три от групите (1^{ва}, 2^{ра} и 4^{та}) са в западната част на рудника в близост до диоритите, група 3 е на север, а група 5 в южния участък, като последните две са в непосредствена близост с вулканичните скали.

Като характерен показател за всяка от точките, изменението на който достатъчно добре представя поведението ѝ, е използван тримерния вектор (3D). Периодът, за който се отнасят данните е от началото на 2019 г. до средата на 2020 г., а обработката е извършена с приложния софтуерен продукт STATGRAPHICS - основните числени характеристики са пресметнати за всяка група и са като тези за група 2 (табл. 5) [5].

Група 2

табл. 5

№ на точка	54	72	65	47	66	44	46
брой резултати	2271	3694	3591	2223	2939	3480	2248
средно	0.104	0.102	0.092	0.046	1.038	1.449	0.051
медиана	0.097	0.097	0.105	0.036	1.044	1.446	0.041
мода	0.096	0.093	0.106	0.035	1.061		0.039
дисперсия	0.001	0.000	0.001	0.001	0.001	0.002	0.001
стандарт	0.031	0.014	0.028	0.028	0.025	0.044	0.025
коефициент на вариация	30.22%	14.26%	30.09%	60.38%	2.36%	3.07%	49.19%
минимум	0.086	0.074	0.016	0.022	0.941	1.362	0.026
максимум	0.407	0.197	0.217	0.129	1.117	1.575	0.131
размах	0.321	0.123	0.201	0.107	0.176	0.213	0.105
асиметрия	7.936	1.557	-0.654	2.141	-0.765	0.926	2.046
ексцес	69.328	2.100	2.025	2.821	0.131	0.514	2.533



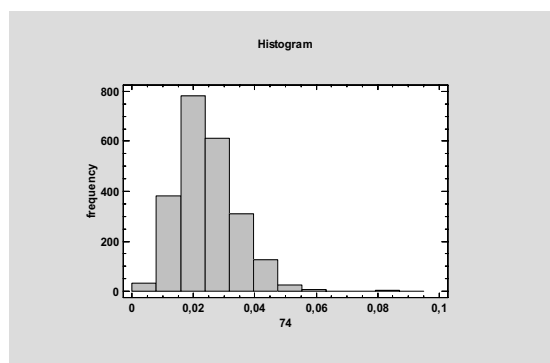
Всички линейни оценки са в метри, а стандартизираните стойности на асиметрията и ексцеса за по-голяма част от точките дават основание за обосновано предположение за нормално разпределение на стойностите на тримерния вектор. Големите стойности на коефициента на вариация в някои случаи са предопределени от технологията на добива, без видимо да е нарушен стабилитетът на откосите. Най-значимите максимални стойности са за точките от група 2 и 3, които попадат в зоните на активно изземване на минна маса.

За стабилно състояние на съответната зона, както и за проблеми в отделни нейни участъци, друг показател който може да се използва са *коефициентите на корелация* между точките от всяка група - табл. 6, гр.1 и гр. 3 (аналогични са и за останалите групи).

табл. 6

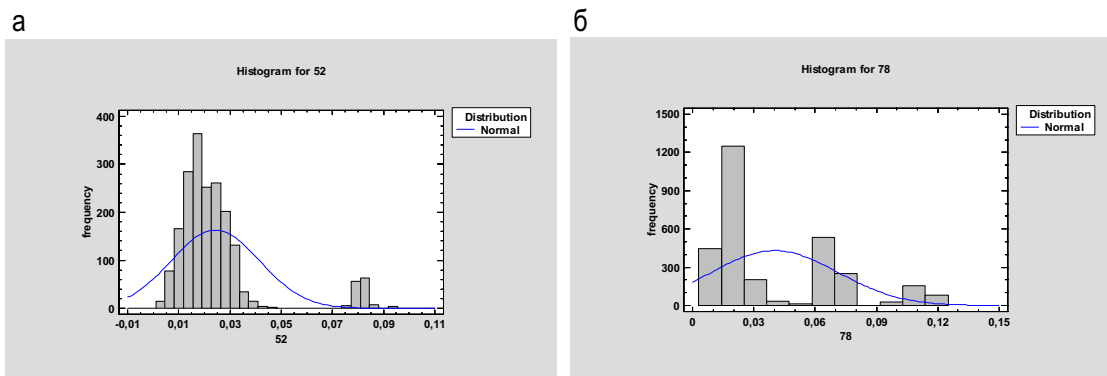
	52	50	51			
52		0,9187 (1567)	0,9178 (1285)			
		0,0000	0,0000		1	3
50	0,9187 (1567)		0,9808 (1281)	1		0,9535 (3237)
	0,0000		0,0000			0,0000
51	0,9178 (1285)	0,9808 (1281)		2	0,9535 (3237)	
	0,0000	0,0000			0,0000	

Корелационните коефициенти са на първо място, а в скоби е броя на двойките стойности, от които са изчислени. С удебелен шрифт са коефициентите гарантиращи надеждността на определените стойности за линейна корелация между точките от групата (ако те са < 0.05 надеждността е над 95%, в случая е почти 100 %). Корелацията между параметрите на точките в група 1 и група 3, показва равномерна проява на преместванията при тях. При некорелирани стойности величините имат случаен характер.



фиг.3

Разпределението на стойностите на тримерния вектор за всяка точка показва едно типично *модално разпределение* за 7 от точките (от общо 19), както показано за т.74 (фиг. 3). За другите точки при разпределението се наблюдават повече от един пик, като става дума за *полимодално разпределение* – бимодално за т. 52 (фиг.4 а) и тримодално при т. 78 (фиг. 4 б).



фиг. 4

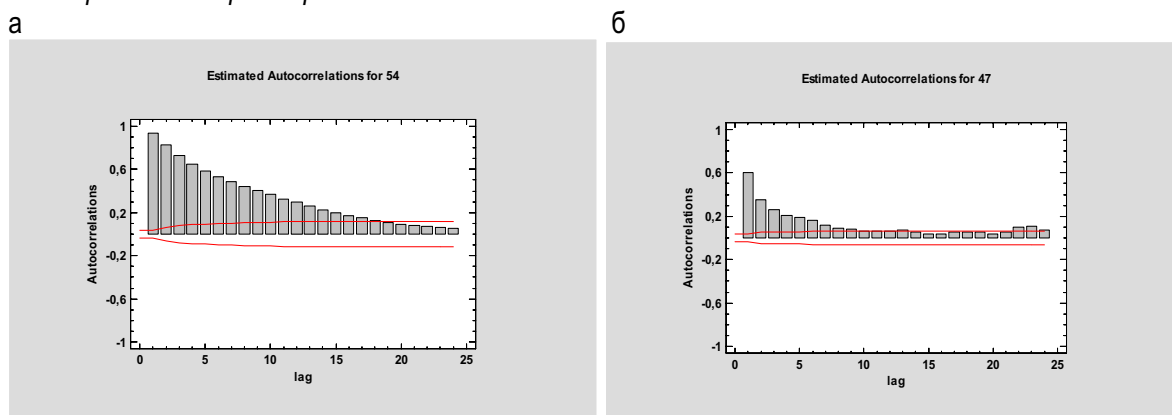


Наличието на повече от една върхова стойност показва наличие на данни с различен генезис (нееднородни данни). Във връзка с това тези допълнителни групи от данни (при втория или третия пик), са анализирани по отношение на времето (момента на тяхното проявяване). Голяма част от стойностите на тези тримерни вектори, за някои точки (1, 3, 44 над 50 %) и особено за точки разположени на ниски хоризонти (стръмни визури!), попадат в диапазона на сутрешните измервания (по-разширен разбира се), при чувствителното влияние на вертикалната рефракция. Филтрацията на дните, когато са провеждани взривните работи не показва някакво тяхно значимо присъствие.

Друга характерна особеност, която се наблюдава е големия брой дни, основно от зимните месеци и късната есен и ранната пролет, когато са тези отклонения. Това е времето на интензивните валежи (дъжд и сняг) и мъглите. Макар и стабилизирани добре, отделни точки, респективно призмите, могат да се преместят заради това, без да има проблем със стабилитета на откосите. Лошите условия пречат и на видимостта от станциите до реперите – липсват записи и данни. В действителност няма нито една дата от летните месеци, в която да се появяват такива пикови стойности. Това е индикация за наличие на сезонен тренд, в основата на който стои неблагоприятното влияние атмосферните условия.

За по-задълбочен анализ на същия този тримерен вектор, разглеждан като временен ред от случайни величини, може да се използва и корелационната, респективно автокорелационната функция (АКФ) - изчислени са стойностите на автокорелационната функция за всички точки, като целият времеви период е разделен в случая на 24 стъпки.

Анализът на графиките на АКФ показва, че в повечето случаи (т.46, 54, 62, 64, 66) процесът е стационарен и ергодичен (фиг. 5 а), а някои други (напр. т.47 и т.51) (фиг. 5 б) свидетелстват за квазипериодичен характер на изменение.



фиг. 5

По-съществени обосновани изводи са:

- моделът на корелационната зависимост може да бъде използван за прогнозиране за определени точки по данни за други;
- технологията на добива когато се изземва скална маса от различни геоложки типове скали, не нарушава състоянието на откосите в работните участъци;
- проблемите при генерирането на окончателни резултати, са в резултат до голяма степен и на влиянието на атмосферните условия и сезонните промени;
- оптималното разположение и броят на наблюдаваните репери са в основата на окончателните заключения по отношение сигурността и стабилитета на откосите.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Една значима част от маркшайдерските наблюдения са свързани с установяването и контрола на потенциални деформационни процеси в скалния масив. Крайните резултати до голяма степен зависят от геоложките и хидрогеоложките условия в района или за отделни участъци от рудника, както



и от метеорологичната обстановка. Критичността на зоната на добивните работи и скоростта на движение на контролните репери налагат понякога промяна в методиката за мониторинг. А геоложкото райониране и стабилизиране на репери в обособените типове скали, с извършване на статистически анализ на векторите на преместване, разкрива характера на деформационния процес, наличие/отсъствие на корелационни зависимости, с достатъчна надеждност при оценките.

ЛИТЕРАТУРА

1. Димитров, Д. Инженерна геодезия, София, Техника, 418, 1989.
2. Инструкция за изследване на деформациите на сгради и съоръжения чрез геодезически методи, София, Главно управление по геодезия, картография и кадастър, 1980.
3. Маждраков, М. Маркшайдерство. Методика на маркшайдерските работи в откритите рудници, Университетско издателство „Св. Климент Охридски“, София, 192, 2007.
4. Settles, E., Göttle, A. and Von Poschinger, A. Slope monitoring methods - a state of the art report. ClimChalp Interreg III B Alpine Space. Work package 6, 2008.
5. STATGRAPHICS 19 – статистическа обработка и анализ.