



ГЕОДЕЗИЧЕН МОНИТОРИНГ НА ПРЕМЕСТВАНИЯ И ДЕФОРМАЦИИ НА ОБЕКТИ ОТ
ИНЖЕНЕРНАТА ИНФРАСТРУКТУРА НА ПОВЪРХНОСТТА ЗА ОЦЕНКА НА ЕФЕКТИТЕ ОТ
ПРЕКРАТЯВАНЕ ЕКСПЛОАТАЦИЯТА НА МИНИ ПЕРНИК

д-р инж. Иван Калчев, инж. Мария Калчева
ГЕО ПЛЮС ЕООД, бул. „Цар Борис III” № 215, партер, офис 7,
гр. София 1618, България (ikaltchev@geoplus-bg.com)

GEODETIC MONITORING OF DISPLACEMENTS AND DEFORMATIONS FOR
ASSESTMENT OF EFFECT FROM SUSPEND OF EXPLOITATION OF PERNIK MINES

Ivan Kaltchev, PhD, Maria Kaltcheva

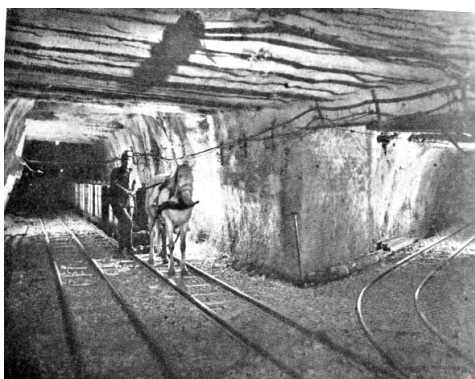
ABSTRACT

In the last years, after the mining operations were stopped on 2000, emergency situations occurred on the territory of the town of Pernik, which are directly related to the mining activity carried out in the Pernik basin. The main goal of the project is to carry out studies and analyzes of the geodetic network for surveying of the movements and deformations of the land surface in order to organize specialized monitoring as a preventive measure for the purpose of conservation of objects and facilities from the harmful influence of the mining works and the consequences of stopping their operation.

Keywords: *Deformations and movements monitoring; Precise geodetic measurements - methods and instruments*

I. ОБЩИ ДАННИ

Пернишкият въгледобивен басейн е най-старият в България – експлоатацията му започва на 17.08.1891г. Разположен е на площ 260 кв.км. Подземните минни изработки се простират на площ около 49 кв.км.



Фигура 1: Галерии на Мина Перник в миналото

A. Обект на интерес

Дълбочината на залагане на въглищните пластове е сравнително малка – 10-130m. В следствие на експлоатацията по подземен добив под голяма част от жилищните квартали и изградената инженерна инфраструктура на град Перник съществуват големи иззетите подземни пространства и галерии.

В последните години след спиране на минните дейности през 2000 година на територията на град Перник възникнаха извънредни ситуации, които са пряко свързани с миннодобивната дейност, извършвана в Пернишкия въгледобивен басейн. Рисковите и аварийни ситуации потенциално засягат всички видове инженерни съоръжения на земната повърхност на територията на гр. Перник (сгради, улици, пътища,

жп-линии, мостове, стадиони, други съоръжения), както и елементите на подземната инженерна инфраструктура (водопроводи, газопроводи, канализация, кабелни трасета и др.). Появата на рисковите и аварийни ситуации се обуславя от два основни взаимосвързани фактора:

1. На дълбочина от 2-3m до около 50-60m под земната повърхност в района на гр. Перник съществуват множество стари минни изработки и иззети пространства, останали от



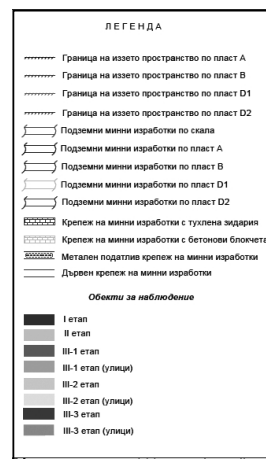
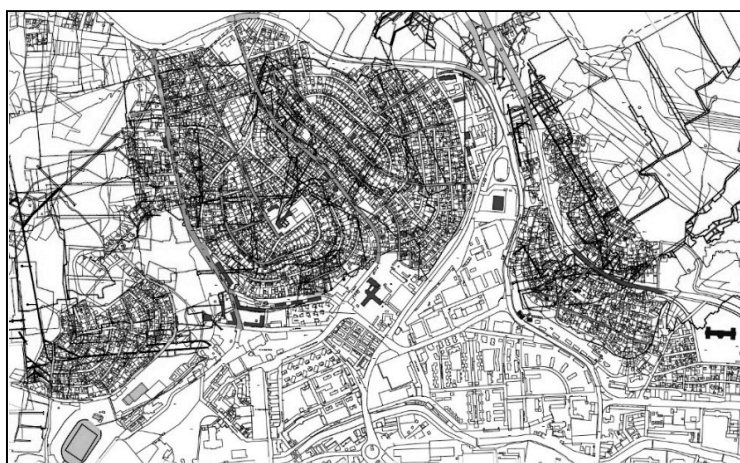
изоставените и ликвидирани подземни въгледобивни рудници. Освен тези подземни минни изработки съществуват отработени и изоставени полета (участъци) от открития въгледобив в Пернишкия басейн, които от своя страна допълнително усложняват геомеханичната и хидроложка обстановка в района.

2. Прекратен е водоотлива в подземните минни изработки, а същевременно се повишават количествата на валежите от пролетта на 2005г. насам. Вследствие се наводняват минните подземни изработки и котловани на откритите участъци и водонасищат иззети пространства, обрешки и насипища. Водата се просмуква през водопроводящите пукнатини, преминаващи през почвения слой и над въглищния скален масив.

В. Проект за геодезичен мониторинг на премествания и деформации

Целта на проекта е да се изпълнят предпроектни проучвания и анализи и да се предложат проектни решения за доразвиване на реперната мрежа за геодезични и маркшайдерски наблюдения за движението и деформациите на земната повърхност, минния масив и най-заstraшените обекти на повърхността с цел организиране на специализиран мониторинг като превантивна мярка с цел опазване на обекти и съоръжения от вредното влияние на проведените минни работи и последствията от спиране на експлоатацията им. Въз основа на предварителни проучвания са дефинирани границите и обхвата на териториите, предмет на проекта – около 213ha, включващи 7 жилищни квартала в центъра на гр. Перник.

Проектът дефинира обектите, които са предмет на защита от неблагоприятни влияния на подземните минни работи. Всички обекти, за които са получени официални сигнали от граждани, обекти от социална значимост (болница, училища, детски градини), сгради и конструкции, намиращи се над „кръстове“ на минни галерии, като потенциално най-опасни места от срутвания и деформационни процеси, сгради, намиращи се в близост до границите на иззети полета на въглищни пластове, профилни линии по улици като инфраструктурни обекти, са включени в обхвата на проекта за мониторинг. При подбор на сградите за мониторинг са отчетени техните основни характеристики, като конфигурацията спрямо изработките, етажност, заета площ, конструкция, фундиране и актуално състояние, като са подбрани само сгради с масивна конструкция.



Фигура 2: Определяне и категоризиране на обектите, подлежащи на опазване от вредното влияние на подземните минни изработки

Дефинираните групи от обекти и съоръжения са категоризирани в съответствие с „Инструкция за опазване на обектите и съоръженията от вредното влияние на подземните минни работи във въглищните басейни“ от 1983г.:



№ по ред	Категория	Общо описание на опазваните съоръжения и обекти	Допустими максимални деформации			
			Наклон i , mm/m	Кривина K , mm/m ²	Радиус на кривина R , m	Хоризонтални деформации ϵ , mm/m
1	I	Пет етажни и по-високи жилищни и обществени сгради	4	0.2	5000	2
2	II	Детски ясли и градини, независимо от броя на етажите с дължина до 50 m; Мостове на ЖП линии с дължина до 20 m; 3,4 етажни обществени и жилищни сгради с дължина над 40m.	8	0.4	2500	3
3	III	Едноетажни сгради с дължина над 20 m; Двуетажни жилищни и обществени сгради с дължина до 40 m; Едноетажни складове с дължина над 40 m; ЖП линия.	12	0.6	1700	6
4	IV	Едноетажни сгради с дължина до 20 m; Всички пътища в обхвата на проекта.	20	0.8	-	10

Фигура 3: Категоризиране на обектите и съоръженията за мониторинг на деформации с допустимите максимални стойности на деформационните параметри

Използвани са основно три типа геодезически знаци за стабилизиране на точките от пространствената геодезическа мрежа за мониторинг – дълбочинни нивелачни репери, стенни нивелачни репери и комбинирани земни марки за хоризонтални и вертикални измервания. Местата на геодезическите знаци са определени въз основа на съществуващата информация от плановете за подземните минни изработки и галерии и кадастралната карта на града. Изградената геодезическа мрежа включва 362 комбинирани марки, 708 контролирани стенни репери и 27 дълбочинни нивелачни репера.

Методологията и технологията за реализиране на прецизните геодезически измервания са добре известни. За осигуряване на необходимата точност на наблюдаваните вертикални премествания и деформации се определят абсолютни надморски височини на контролираните нивелачни репери чрез прецизна геометрична нивелация II клас със средна квадратна грешка $\leq 0.70\text{mm}$ на 1km двойно пронивелирано разстояние. Нивелацията се извършва чрез високоточни дигитални нивелири в комплект с инварни нивелачни лати.

Хоризонталните премествания и деформации на обектите над подземните минни изработки и галерии в този проект се изчисляват от измерените координати на контролираните точки, определени чрез комбинация от GNSS и тригонометрични методи. Точността на определяне на базите между всеки две от измерваните точки, върху които са монтирани GNSS приемници, е в границите на $m_s=2.5\text{-}5\text{mm}$. Ъглово-линейните измервания се реализират по три-ставния метод с електронни тотални станции със средна квадратна грешка на измерените ъгли $m_\beta \leq \pm 2''$ и на измерените дължини $m_s \leq \pm(2\text{-}3\text{mm}+2\text{ppm})$.

Периодичността на кампаниите за извършване на геодезическите измервания е 6 месеца, като са предвидени допълнителни кампании в случай на настъпване на извънредни събития, като земетръс, наводнение или поява на видими нарушения на конструкциите. За период от последните 12 години на организирани наблюдения не са извършвани такива извънредни кампании, въпреки настъпилото сериозно земетресение в района на гр. Перник през 2012г.

II. ГЕОДЕЗИЧЕСКИ ИЗМЕРВАНИЯ

Последната 15-та кампания на геодезически измервания за мониторинг на премествания и деформации е реализирана през май-юни 2019. Представяме обобщени резултати от тези измервания.

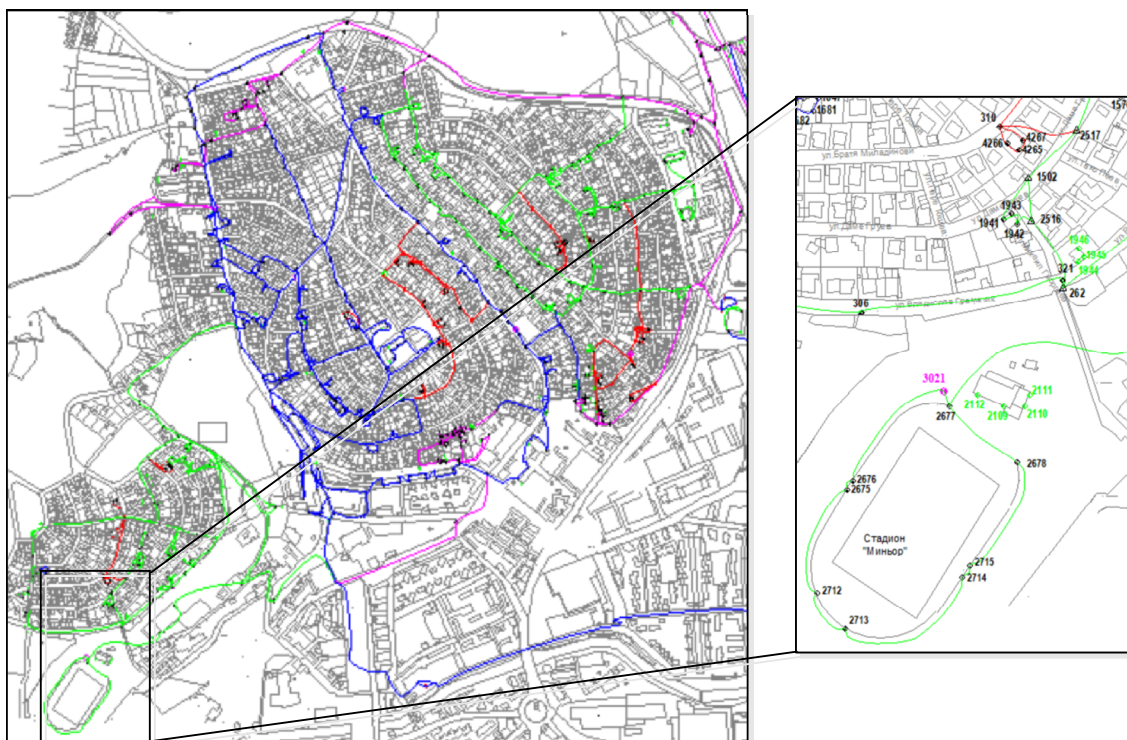
A. Прецизна геометрична нивелация

Прецизната геометрична нивелация е извършена с високоточни дигитални нивелири LEICA NA3003 и LEICA DNA03 в комплект двойки инварни баркодови лати. Използван е методът BFFB (Back-Fore-Fore-Back – Назад-Напред-Напред-Назад) за измерване на превишенията за всяка станция на инструмента



в нивелачните ходове. Всички превишения между реперите са измерени в две посоки (отиване и връщане).

Общата дължина на двойно пронивелираните нивелачни ходове в мрежата е 54 253m. Броят на двойно определените превишения е 1115 (общо 2230 измерени превишения), а броят на включените нивелачни репери (изходни и контролирани) е 938:



Фигура 4: Фрагмент от схемата на мрежата за прецизни нивелачни измервания

В. GNSS наблюдения

За привързване на мрежата от контролирани точки за геодезически измервания на хоризонтални премествания и деформации с изходни точки от държавната геодезична мрежа се извършват прецизни GNSS измервания. Те се реализират с професионални геодезически GNSS приемници LEICA GPS SYSTEM 530 (5 броя), SOKKIA RADIAN-IS (4 броя) и CHC HUACE X91/X900 (3 броя) в комплект със стандартни принадлежности за монтиране на антените на дървени триноги и центриране върху точките чрез оптически отвеси.

Общият брой на точките, чиито координати се определят чрез GNSS измервания, е 145. Общият брой на определените пространствени вектори в мрежата е 436 (1308 координатни разлики). Поради големия брой едновременно използвани GNSS приемници са определени пространствени вектори не само между референтните базови станции и ново определяните точки, но и между голям брой подвижни приемници в нови точки.

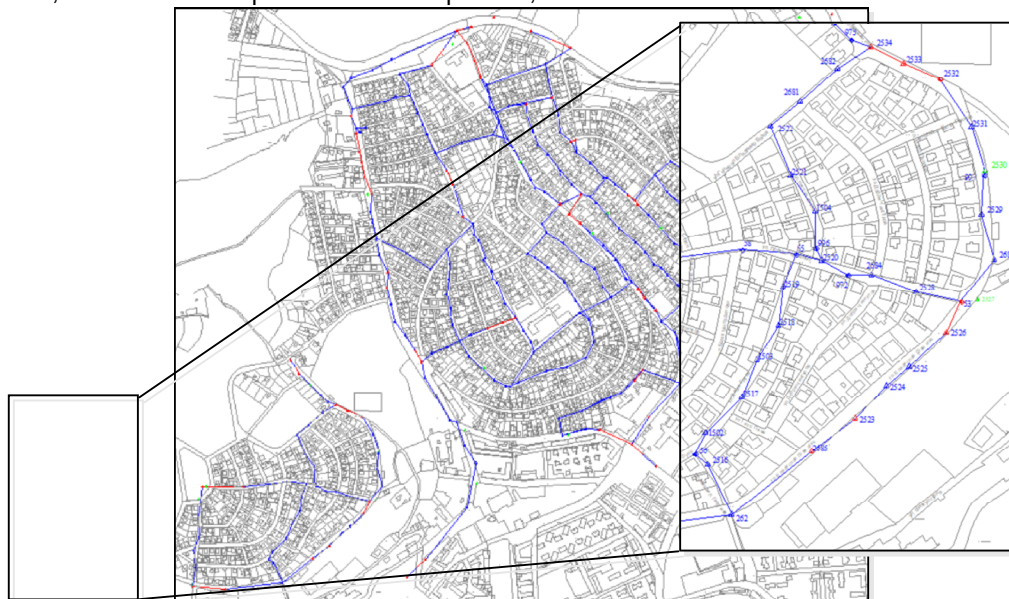
С. Прецизни полигонометрични (ъглово-линейни) измервания

Поради факта, че голяма част от контролираните точки за мониторинг на хоризонтални премествания и деформации са разположени в градска среда, където условията за GNSS измервания не са подходящи, в тези райони на плановата геодезична мрежа се изпълняват допълнителни геодезически измервания с конвенционална технология. Това решение е обосновано от основната цел да се получават надеждни крайни резултати за координатите на контролираните точки, които са поставени на специфични места спрямо съществуващите подземни галерии. Местата на контролираните точки са



фиксираны спрямо наблюдаваните обекти и не може да се преместват заради ограничения на използваната технология на измерване.

Измерванията се извършват с прецизни тотални станции LEICA TC1610 (ъглова точност $5''$, дължинна точност $3\text{mm}+2\text{ppm}$) със стандартни принадлежности за монтиране на инструмента и отражателните призми върху дървени триноги и центриране с оптически отвеси. Общият брой на точките, чиито координати са определени чрез полигонометрия, е 300. За изчисленията се използват като изходни 85 точки, определени чрез GNSS измервания. Общият брой на ъглово-линейните измервания, използвани в изравнението на мрежата, е 917 за всяко.



Фигура 5: Фрагмент от схемата на прецизна полигонометрична и GNSS мрежа

III. ОБРАБОТКА НА ГЕОДЕЗИЧЕСКИТЕ ИЗМЕРВАНИЯ

А. Обработка на измерванията от прецизна геометрична нивелация

Обработката на измерванията с дигитални нивелири се изпълнява в специализиран софтуер DigitalLeveling – собствена разработка на нашия екип, разработен специално за целите на големи геодезически мрежи, както е случая с Мини Перник. Извършена е предварителна обработка на измерените превишения и разстояния в нивелачната мрежа чрез определяне на несъвпадения в затворени и включени нивелачни ходове. Изчислените стойности на измерените превишения са подложени на строго параметрично изравнени по метода на най-малките квадрати (МНМК). Резултатите от изравнението показват, че най-голямата стойност на средна квадратна грешка в изравнените коти е 0.99mm . Средната квадратна грешка за измерване с тежест единица за цялата мрежа е $M_e=0.3\text{mm}$, което кореспондира с априорната стойност на средната квадратна грешка на измерванията с използваните инструменти (0.4mm).

В. Обработка на GNSS измервания

Обработката на GNSS измервания се изпълнява в среда на специализирания софтуер Leica Geo Office. Всички пространствени вектори между измерваните точки са определени от GNSS измерванията. При тези изчисления са определени средни квадратни грешки на координатните разлики dX , dY , dZ , формиращи всеки вектор, въз основа на многократните измервания. Максималната стойност на тези грешки за изравнените координати е 3.5mm .



с. Обработка на ъглово-линейните измервания

Обработката на ъглово-линейните измервания се изпълнява в среда на специализиран софтуер WIN TPLAN. Предварителната оценка на точността на измерените ъгли и дължини се извършва по затворени фигури. Измерените стойности на ъглите и дължините се подлагат на строго параметрично изравнение по МНМК. Резултатите от това изравнение показват, че максималната стойност на средните квадратни грешки на изравнените координати е $m_s=7.98\text{mm}$. Средната квадратна грешка на измерване с тежест единица за цялата мрежа е $M_e=5.7^{\text{CC}}$, което кореспондира с априорната точност на използваните тотални станции.

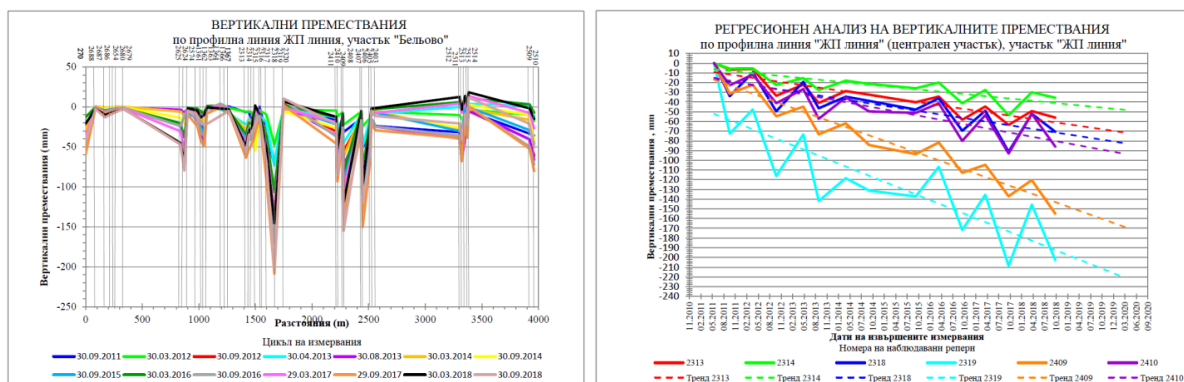
IV. СРАВНИТЕЛЕН АНАЛИЗ НА РЕЗУЛТАТИТЕ ОТ КАМПАНИИТЕ ГЕОДЕЗИЧЕСКИ ИЗМЕРВАНИЯ

Всички резултати от изпълнените кампании геодезически измервания са събрани в специализирана база данни, създадена за проекта в среда на географска информационна система (ГИС). В тази среда се извършват допълнителни сравнителни анализи за установяване на настъпилите премествания и деформации.

А. Анализ на данните за вертикални премествания

За целите на сравнителния анализ на данните от проведените кампании геодезически измервания от определените надморски височини на нивелачните контролирани репери при всеки цикъл се изчисляват вертикални премествания. Абсолютните вертикални премествания се изчисляват за периода от датата на нулевото измерване до датата на последната кампания, а относителните вертикални премествания се изчисляват за периода между предходната и последната кампания. Определят се също годишни премествания и скорости на премествания за всяка контролирана точка.

Настъпилите вертикални премествания се представят и в графичен вид чрез ходограми във времето на линейните изменения на надморските височини на контролираните точки, групирани по профилни линии и обекти, като се показват и предвиждания за тяхното развитие на базата на регресионен анализ:



Фигура 6: Графики на линейните изменения във времето на вертикални премествания по профилна линия и по обекти

От проведените анализи е видно, че за повечето контролирани репери стойностите на наблюдаваните вертикални премествания са сравнително по-големи от точността на метода за определяне на надморските височини. Това дава основание да се формира заключение с висока степен на достоверност, че са налични реални вертикални премествания в контролираните репери и обекти.

Вертикалните деформации се изчисляват въз основа на установените вертикални премествания. Резултатите се представят в табличен вид, в които се показват основните деформационни параметри съгласно „Инструкция за защита на съоръженията и конструкциите от вредното влияние на подземните минни работи във въглищните басейни“, издадена от Министерство на енергетиката, София 1983 г. –



наклонът i (mm / m), кривина (mm / m²) и радиус на кривината R (m) за приложени случаи на обекти (върху сгради и линейни обекти - пътища и железопътни линии).

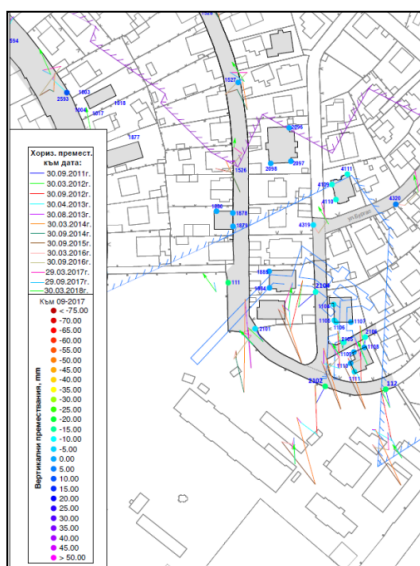
В. Анализ на данните за хоризонтални премествания

Стойностите на изчислените координатни разлики dX , dY за периода между началната и последната кампания геодезически измервания, се представят в таблична форма. От тези координатни разлики се изчисляват елементите на векторите на хоризонтални премествания – дължини dS и посочни ъгли α , както и скорост на развитие на хоризонталните премествания. Стойностите на хоризонталните деформации ϵ (mm/m), изчислени съгласно Инструкцията, също се представят в таблиците.

За илюстриране на сравнителните анализи на резултатите от геодезическите измервания се изработва комбинирана схема, съдържаща:

- Местоположение на елементите от инженерната инфраструктура на земната повърхност върху кадастралната карта на град Перник;
- Местоположение на подземните минни изработки, галерии и полета;
- Местоположение на репеите и геодезическите точки;
- Изчислените хоризонтални и вертикални премествания в контролираните точки.

Хоризонталните премествания се представят графично чрез траектории на преместванията, като се прилага цветова схема в зависимост от периода на настъпването им между отделните кампании на измервания. Използва се също цветова скала за представяне на вертикалните премествания, като в зависимост от стойностите им се формират групи репери, оцветени в различни цветове. Пример на такава комбинирана схема е даден на следната фигура:



Фигура 7: Фрагмент от комбинирана схема за графично представяне на промените във вертикалните и хоризонтални премествания

С. Изводи и препоръки

За всяка кампания измервания се извършва детайлен анализ на констатираните премествания, деформации и тенденции в промените им, отчитайки местоположението на контролираните точки, началния момент на наблюденията, типа на наблюдаваните обекти и други фактори.

Констатирана е връзка между величината на вертикалните и хоризонталните премествания, като в участъци с по-значително действително слягане се откриват и по-високи стойности на хоризонталните премествания. Налице е ясна тенденция посоките на векторите на хоризонтални премествания да



следват посоките на наклона на терена и подземните слоеве, което потвърждава коректността на наблюдаваните хоризонтални движения. Особено ясна е тенденцията на хоризонтални премествания на точките от железопътната линия – векторите имат посоки, перпендикулярни на оста на линията, в зависимост от положението на точките спрямо оста в противоположни посоки към падането на насипа. Трябва да се отбележи периодичността на диаметралната промяна на посоката на векторите на хоризонталните премествания с по-значими стойности, като траекторията показва сезонни вариации на контролираните точки около първоначалното положение, които съвпадат с колебанията на вертикалните премествания. В резултат на данните от геодезическите изследвания и установените премествания и деформации, действащи в участъци от железопътната структура, съответната административно отговорна институция взе решение да проектира и изпълни укрепване за защита на конструкцията на този важен инфраструктурен обект.

Разработената база данни с ГИС, със събрана актуална геодезическа информация за протичането на деформационните процеси, ще бъде полезен инструмент за по-нататъшното проектиране на мерки за укрепване и защита на жилищни райони на гр. Перник.

Изпълнявайки най-големия проект за геодезически измервания и изследвания на опасни техногенни геодинамични процеси в България за последните 12 години, екипът изпълняващ проекта, придоби и доразви професионалната си квалификация и разшири практическия и теоретичния опит в тази много специализирана област на геодезическата наука и практика.

V. ПЕРСПЕКТИВИ ЗА РАЗВИТИЕ НА ПРОЕКТА

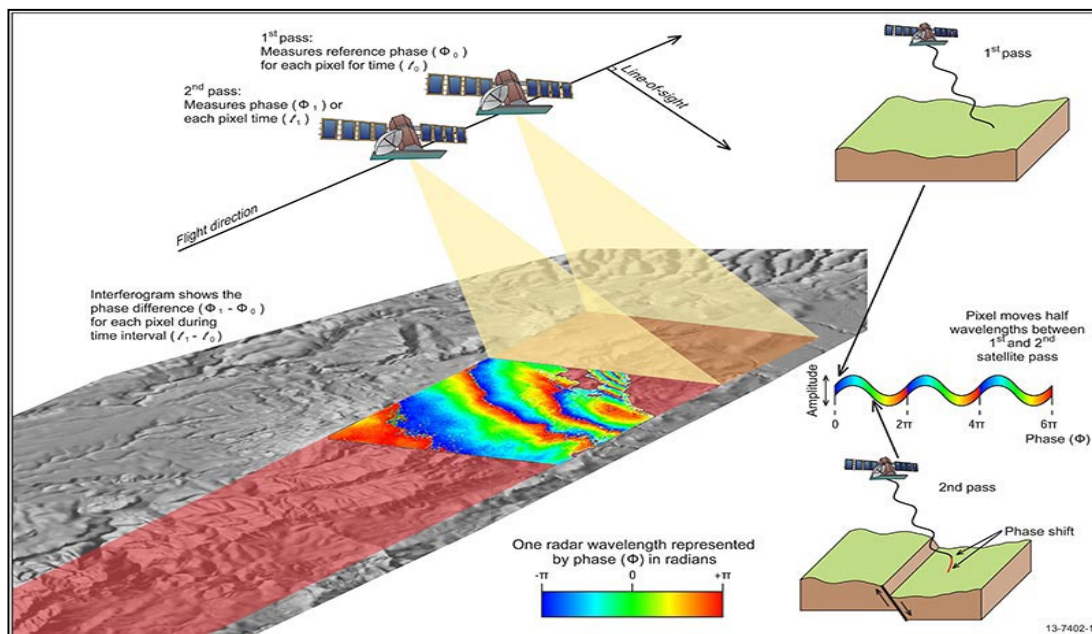
През април 2021г. беше възложено проектирането на следващия етап V от развитието на проекта за оптимизиране на пространствената реперна мрежа и провеждане на геодезичен мониторинг на движенията и деформациите на най-заstraшените обекти на повърхността от прекратените подземни минни дейности към „Мини-Перник“ ЕАД(п). Към традиционните геодезически измервания проекта предвижда добавяне на пиезометрични измервания за наблюдения на нивата на подпочвените води в масива на наблюдавания район. Освен това в проекта е добавена нова технология за мониторинг на промени в земната повърхност и обектите на инженерната инфраструктура вследствие на минни изработки в района на гр. Перник - спътникова диференциална радарна интерферометрия.

Радарната интерферометрия с изкуствена антена - Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) и по точно Диференциалната интерферометрия – DInSAR, намират все по-масово приложение при установяване с висока точност (порядък на mm), на деформации и промени на земната повърхност. За целта от сензор – датчик разположен на спътник се излъчва радиосигнал, който достига земната повърхност, отразява се от нея, връща се обратно до датчика на спътника и се регистрира. При това чрез измерване на времето за двойното преминаване на разстоянието сензор – земна повърхност – сензор от радиовълните или величини свързани с него (фази на вълните) и известната скорост на разпространение на вълните се определят разстоянията от сензора до точки от земната повърхност. Спътниците преминават над един и същи земен район през определен период от време (например 11 дни) и по този начин се получават серия от сканирания на една и съща част от земната повърхност. При всяко сканиране прецизно се определя местоположението на огромно множество точки от земната повърхност като се използва принципа на интерферометрията на вълните, а от тук и на изменението в положението на тези точки.

Методът на диференциална интерферометрия на PCA (DInSAR) се основава на обработката на две PCA изображения регистрирани върху на една и съща част от повърхността на Земята получени в различни от моменти време. При метода на интерферометрия с повторно преминаване на носителя откриването и количественото определяне на земните премествания настъпили между двете дати на получаване на данните може да се постигне чрез тяхната диференциална обработка. В резултат на тази обработка се получава изображение наречено диференциална интерферограма (растерно интерферометрично изображение), съответстващо на земните премествания в хоризонтална и вертикална равнини, което е настъпило между регистрирането на данните и пространствена разделителна способност (PPC), която варира в зависимост от режима на работа на PCA. Например,



за Sentinel-1 основния режим е с ПРС 15x15 m, а ПРС при TerraSAR-X може да бъде 1x1 m или дори 0.25x.25m. Изместването се изчислява чрез диференциране на фазовия компонент на двете основни SAR изображения след премахване на топографския ефект.



Фигура 8: Интерферограма, създадена чрез използване на две SAR изображения, получени за два различни момента, картографиране на фазовото изместване, причинено от движение на повърхността между двете регистрации на данни

DInSAR е дистанционен метод, който допълва прилаганите към момента „традиционни“ геодезически методи за мониторинг на премествания и деформации. Същественото предимство на дистанционния метод се състои във факта, че чрез него се осигурява възможността да се регистрират промени на земната повърхност на големи или трудно достъпни зони, дава много по-голяма представителност на настъпилите деформационни процеси в териториално (площно) отношение в сравнение с дискретните измервания при преките геодезически методи. По този начин се дава възможност за по-обхватен анализ на изследваните територии и насочване на усилията към потенциално по-застрашени обекти от инженерната инфраструктура и райони на земния масив.