



**МИННО-ГЕОЛОЖКИ УНИВЕРСИТЕТ „СВ. ИВАН РИЛСКИ”,
СОФИЯ
МИННОТЕХНОЛОГИЧЕН ФАКУЛТЕТ
КАТЕДРА „РАЗРАБОТВАНЕ НА ПОЛЕЗНИ ИЗКОПАЕМИ“**

маг. инж. Димитър Димитров Кайков

**УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОТО НА РУДАТА ЧРЕЗ МОДЕЛИРАНЕ
МЕСТОПОЛОЖЕНИЕТО НА ПОЛЕЗНОТО ИЗКОПАЕМО СЛЕД
ВЗРИВЯВАНЕ**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертационен труд за присъждане на
образователна и научна степен **"ДОКТОР"**

Научна област:

Професионално направление: 5.8 Проучване, добив и обработка на полезни изкопаеми

Докторска програма: „Открит и подводен добив на полезни изкопаеми“

Научен ръководител:

Проф. д-р Ивайло Копрев

Научен консултант:

Проф. д-р Илия Гърков

СОФИЯ, 2022 г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от Разширен катедрен съвет на катедра „Разработване на полезни изкопаеми“ към Миннотехнологичен факултет на МГУ „Св. Иван Рилски“, София, на 01.04.2022 г., съгласно Ректорска заповед № Р-214 от 25.03.2022 г.

Материалите по защитата са на разположение на интересувашите се в канцеларията на Сектор „Студентска и преподавателска мобилност“ на МГУ „Св. Иван Рилски“, Ректорат, ет. 3, стая № 79, тел. 02/ 80 60 209.

Утвърденото Научно жури е в състав:

1. Проф. д-р Димитър Стоянов Анастасов, МГУ „Св. Иван Рилски“;
2. Проф. д.т.н. Валери Емилов Митков, МГУ „Св. Иван Рилски“;
3. Проф. д-рн Георги Василев Бахчеванов, НБУ;
4. Проф. д.н. Георги Димитров Тодоров, ТУ-София;
5. Проф. д-р Емил Георгиев Михайлов, ХТМУ;

Резервни членове:

2. Проф. д-р Ирена Любенова Григорова, МГУ „Св. Иван Рилски“;
3. Проф. д-р Станчо Петков Петков, БАН

Дисертационният труд е в обем от **176** страници, като включва увод, **3** глави за решаване на формулираните основни задачи, списък на основните приноси, списък на публикациите по дисертацията и използвана литература. Цитирани са общо **182** литературни източници, като **131** са на латиница и **40** на кирилица, а останалите са интернет адреси. Работата включва общо **100** фигури и **44** таблици. Номерата на фигурите, таблиците и формулите в автореферата съответстват на тези в дисертационния труд.

Дисертантът е на самостоятелна подготовка докторант към катедра „Разработване на полезни изкопаеми“ на Миннотехнологичен факултет.

Автор: маг. инж. Димитър Димитров Кайков

Заглавие: УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОТО НА РУДАТА ЧРЕЗ МОДЕЛИРАНЕ МЕСТОПОЛОЖЕНИЕТО НА ПОЛЕЗНОТО ИЗКОПАЕМО СЛЕД ВЗРИВЯВАНЕ

Тираж: 20 броя

Отпечатано в Издателска къща „Св. Иван Рилски“ на МГУ „Св. Иван Рилски“, София.

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

Откритият добив на полезни изкопаеми представлява един от основните способности за разработване на находищата на минерални суровини. В сравнение с подземния добив при него закономерно се наблюдават по-висока производителност по добита руда и по-благоприятни условия за поддържане на безопасност и здраве при работа, което неизменно го прави по-предпочитан в редица случаи. Към настоящия момент, вследствие на процесите на бързото развитие на науката, техниката, човечеството е свидетел на т. нар. „четвърта индустриална революция“. Промените в сферите на производството и преработката на минералните суровини допринасят до значими изменения в организацията икономиката и функционирането на обществото. В световен план минното производство като ключов отрасъл търпи значителни промени вследствие на развитието на човешките потребности. По данни на Информационния институт за минерални суровини (Mineral Information Institute) за 80-те години дневната консумация на всеки жител на САЩ се равнява на около 60 kg минерални суровини от деня на раждането до достигането на средна пределна възраст от 80 г. Това се равнява средно на $1,7 \cdot 10^6$ t суровини за продължителността на един човешки живот, като в това число влизат строителни материали, индустриални минерали, руди и горива (Tatiya, 2005). От гледна точка на рудните полезни изкопаеми, за продължителността на човешкия живот в това число влизат около 60 g Au и 873 kg Cu, 2 690 kg Al, 454 kg Zn, 489 kg Pb и 19,3 t Fe. Същевременно за последните 50 години се наблюдава тенденция към намаляване на средните съдържания на металите в добиваните руди, което от една страна се свързва с добива и преработката на по-голям обем бедни руди, което е благоприятен фактор за развитието на открития добив и осигуряването на суровини за съществуването на стопанските сектори в пазарната икономика. От друга страна това довежда до по-високи изисквания за осигуряване на по-добра селективност на добива, което изисква прилагането на специфичен набор от технологични решения, позволяващи разделянето на по-бедните от по-богатите руди и разделянето на полезното изкопаемо от некондиционното такова като цяло. В края на XIX в. и началото на XX век средното съдържание на Cu за рудите, добивани в Европа, Канада и САЩ е било около 4 -5%, за Австралия – около 7 %, а за Великобритания е достигало до 8%. В сравнение с настоящите средни съдържания на Cu, те приемат стойности в порядъка 0,3% – 3%, като за България съдържанията са в порядъка около 0,3 - 0,5% (Schodde, 2010). Аналогични тенденции на неколкостранно намаляване на средните съдържания за рудните полезни изкопаеми се наблюдават по целия свят. В това число попадат и рудници с най-високо съдържание на рудите, напр. в Австралия, Канада, Русия, САЩ, Чили, Южна Африка и др. Независимо дали дадено находище е експлоатирано за дълъг период от време или предстои да бъде разработвано, всяко минно-добивно предприятие и целият отрасъл е заставен да адаптира своята цялостна стратегия за развитие съобразно световните тенденции. Вече са факт нови технологии, както и са усъвършенствани стари такива, позволяващи реализирането на по-рационален производствен процес. Започвайки с по-точно информационно осигуряване на геоложките характеристики на находището и завършвайки с прилагането на комплексни модели, позволяващи постигането на по-добри показатели по добив и извличане за даден тип руда, се дава възможност да се отговори адекватно на нарастващите потребности от минерални суровини на обществото. Този естествен процес на намаляване на средните съдържания условно се възприема като естествен процес на „обедняване“ на рудите, но от това не следва, че се намалява качеството на полезните изкопаеми. Напротив, с развитието на минно-добивната и преработвателната промишленост се счита, че се наблюдава значително повишаване на качеството на продукцията. Убедено може да се твърди, че тези две едновременно наблюдавани тенденции засягат фундаментален проблем за минно-добивния отрасъл, а именно, проблемът за формирането на качеството на минната продукция. Поради това проблемът е не само значим, но и актуален в контекста на разглежданите настоящи тенденции в световен план и поради тази причина изисква прилагането на научен подход за неговото решаване. В световен план голям брой колективи работят върху различни аспекти от проблема за осигуряването на необходимите качествени показатели на минната продукция и същевременно поддържайки ги в стабилни граници за по-дълъг период от време. Въпреки това все още няма единна концепция и еднозначен отговор на въпроса за осъществяването на т. нар. „пълнен контрол“ на качеството. Проблемът

е отворен заради неговата комплексност и за неговото решаване е необходимо прилагането на интердисциплинарен подход. Именно поради тази причина в настоящия труд е разгледан отделен проблем в съществуващото множество проблеми в контекста на управление на качеството на рудата – моделирането на местоположението на полезното изкопаемо след взривяване. Този проблем като основополагащ осмисля последващото използване на селективна технология за добив, както и спазването на определен набор от технологични условия, които най-добре се доближават до допусканията на модела. Освен това моделирането на местоположенията на рудните зони в границите на взривения куп дава възможност за разглеждането на различни сценарии преди самото взривяване с цел вземането на своевременни решения за коригиране на използвания паспорт на пробивно-взривни работи.

Цел и задачи на дисертационния труд

Целта на изследването е да се повиши качеството на рудата при открит добив на полезни изкопаеми чрез използване на числени модели, служещи за прогнозиране местоположението на полезното изкопаемо след взривяване.

Основни задачи:

1. Разработване на теоретичните основи на изследвания проблем;
2. Разкриване на общи закономерности на отместването при взривяване;
3. Установяване на зависимости между взривното отместване и индивидуалните особености на средата около даден ВММ датчик;
4. Установяване на приоритетните за проследяване при отместването рудни зони.
5. Създаване на числен модел за прогнозиране на местоположението на рудата във взривения куп;
6. Доказване на икономическия ефект от прилагането на числените модели.

II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

ГЛАВА 1. ТЕОРЕТИЧНИ ОСНОВИ НА ДИСЕРТАЦИОННОТО ИЗСЛЕДВАНЕ

I.1. Същност на управлението на качеството на рудата при добива на полезни изкопаеми

Качеството представлява основополагаща в науката категория, която намира отражение във всяка човешка дейност. Нейното съдържание постепенно се обогатява през историята на човечеството, като най-общо значението ѝ се свежда до съвкупността от дадени свойства, характеристики на даден обект или процес. С развитието на човешкото общество и след първата индустриална революция качеството започва да заема централно място в икономическата сфера и по-точно в сферата производството. При минно-добивната промишленост качеството се отнася както към минната продукция, така и към самите производствени процеси, необходими за реализирането на съответната продукция по време на експлоатацията на дадено находище. Качеството на продукцията и качеството на процесите имат тясна връзка помежду си и следва да бъдат разглеждани в единство, като на първо място трябва да се изясни тяхната същност и след това да се разгледа тяхното взаимно обуславяне.

I.1.1. Качество на рудата при открития добив на полезни изкопаеми

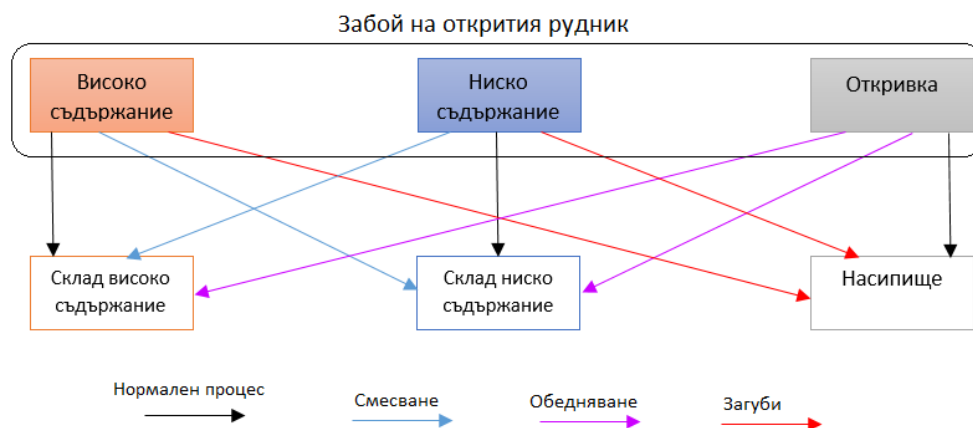
Добитата руда като продукт на даден открит рудник се характеризира с богата съвкупност от свойства, имащи различна степен на значимост за рационалното протичане на последващия процес по нейното обогатяване. Г. Константинов (1997) посочва следната дефиниция за качеството на полезните изкопаеми: ***съвкупността от свойства на продукцията, обуславящи нейната пригодност да удовлетворява определени потребности в съответствие с предназначението ѝ.***

Дефинирането на качествените показатели на рудните полезни изкопаеми започва с оценката им в зависимост от тяхното функционално предназначение. На тази база качеството се определя от комплекса на следните единични показатели: **химичен и минерален състав; физико-механични свойства; структурни и текстурни особености; зърнометричен състав** и други специфични свойства в зависимост от предназначението на рудата. В конкретиката на открития добив основополагащи за формирането на качеството на рудата са **зърнометричният състав на добития материал, съдържание на метал (основни и попълно добивани метали) и съдържанието на вредните примеси**. Границите, на които трябва да отговарят изброените показатели се обуславят от изискванията на процесите свързани със зърнометрична подготовка на рудата в етапите на трошене и смилане, както и от възприетата технология за преработването ѝ във обогатителна фабрика. Именно на тази база се основава цялостната концепция за процесите по управление на качеството на рудата.

I.1.2. Управление на качеството на рудата при открит добив на полезни изкопаеми

В контекста на открития добив на полезни изкопаеми процесът по управление на качеството на рудата се приема за **комплекс от дейности по планиране, изпълнение и регулиране основните и спомагателните производствени процеси, водещи до формирането на устойчив във времето обем руда, притежаващ полезни и вредни свойства в устойчиви за обогатителната фабрика граници.**

Процесите, които непосредствено променят природно зададеното качество на полезното изкопаемо в земните недра, включват **пробивно-взривните работи, изкопно-товарните работи, транспортирането на рудата, складирането и осредняването** на добитата руда. Независимо от вида на добиваната руда, при формирането на качествените показатели на рудата като крайна продукция за открития рудник, се наблюдават два негативни резултата, наличието на които е неизбежно – възникването на загуби и обедняване. На фиг. 1.1 са представени типичните случаи, при които те възникват при осъществяването на технологичните операции.



Фиг. 1.1. Възможни случаи при добива, транспортирането и съхранението на рудата (по Yu, 2021)

Въз основа на проучените литературни източници може да се обобщи, че проблемът за управлението на качеството на продукцията при рудните полезни изкопаеми се свежда до решаване на две основни оптимизационни задачи:

1. **минимизиране отклонението на качествените показатели на добитата руда от природно зададените им стойности чрез намаляване и поддържане на загубите и обедняването на рудата във възможно най-ниски граници;**
2. **осигуряването на еднородност на комплекса от единичните качествени показатели на рудата като краен продукт съобразно приемливите за обогатителната фабрика граници за възможно най-дълъг период от време.**

1.1.3. Същност на информационното осигуряване за управление качеството на рудата

Ефективното управление на технологичните процеси при добива на рудни полезни изкопаеми и адекватното организиране на процесите във времето и пространството, на първо място трябва да включва наличието на информация относно обекта за управление. Изискванията към тази информация е тя да бъде достоверна, последователна, достатъчна и с надежден канал за нейното получаване. Поради тази причина важно значение имат геолого-маркшайдерските работи, особено в случаите на находища със сложна морфология и непостоянни контактни зони между рудата и вместващите скали. Съобразно проблемът за управление на качеството на рудата, основната цел на геолого-маркшайдерските работи се свързва с обслужването на добивните работи, като се определят: качествените показатели и тяхната изменчивост в блоковия модел; геометричните характеристики на взривяваните полета и взривени купове; границите на добивните блокове в забоите; количествените и качествените загуби вследствие на добива за оперативен контрол и др. Като обобщение може да се посочи, че прилагането на по-широк набор от методи за осигуряване на необходимата геолого-маркшайдерска информация осигурява:

- Разделяне на типовете и сортовете руди на базата на качествените показатели и определяне на тяхното пространствено разпределение за находището;
- Получаване на аргументирано решение за посоката на развитие на минните работи, като се разграничават промишлените от непромишлените зони;
- Определяне на прогнозните стойности на процентите на обедняване и загуби по руда;
- Създаване на технологични карти на забоите, позволяващи осъществяването на максимална селективност на добива;
- Планиране, контрол и отчет на изпълнението на параметрите, зададени в паспорта на ПВР.

На тази база могат да се осмислят зависимостите, стоящи зад получените геолого-маркшайдерски данни с цел извеждането на основополагащи закономерности, водещи до повишаването на ефективността от извършването на селективен добив.

1.1.4. Същност на селективния добив за формиране качеството на рудата

При процесите, свързани с управлението на качеството на рудата, е необходимо да бъдат взети под внимание няколко характерни елемента, имащи непосредствено влияние върху нейното състояние – извършването на пробивно-взривни работи и процесът на непосредствено изземване на минната маса. Селективният добив се дефинира като **комплекс от технически и технологични решения, както и организационни мероприятия, осигуряващи обособено изземване на полезните изкопаеми при най-малки загуби и обедняване.**

Едни от най-важните условия, които трябва да се спазват, за да бъде обезпечено рационалното извършване на селективния добив са:

- Осигуряване на **подходящи конструктивни параметри** на стъпалата и работните площадки;
- Наемане на **квалифициран и опитен персонал** и неговото обучение в спецификата на прилаганата технология;
- Прилагане на **подходяща технология** за просто или сложно разработване;
- Осигуряване на **точна и навременна информация** за местоположението на рудните зони преди и след взривяването;
- **Минимизиране и отчитане на замърсяването** на полезното изкопаемо с минен отпадък извършването на пробивно-взривни работи.

Решаващо значение има своевременното постъпване на точна информация относно актуалното местоположение на рудата в границите на взривения куп след извършването на пробивно-взривни работи. Ефективността на селективния добив в значителна степен зависи от степента на замърсяване на рудата с вместиращите скали във взривения куп.

1.1.5. Същност на пробивно-взривните работи за формиране качеството на рудата

При извършването на взривните работи се наблюдава нежелания ефект от смесване на руди с различно съдържание или замърсяването на руда с минен отпадък. Това води до намаляване на средното съдържание на рудата, подавана към обогатителната фабрика поради реализираните загуби и обедняване. Качеството на процесите зависи в най-голяма степен от извършването на пробивно-взривните работи, тъй като посредством тях се оказва най-значимо въздействие върху рудата и вследствие тяхното изпълнение се наблюдават най-високи отклонения на качеството спрямо първоначалното, природно зададеното. При извършването на ПВР в условията на рудодобива е необходимо да бъдат постигнати едновременно три основни цели във връзка с получения резултат:

- Взривеният куп трябва да има **подходяща форма**, позволяваща неговото производително и безопасно изземване;
- Взривената скала трябва да бъде с **подходящ зърнометричен състав**, съобразен с използваната добивна и транспортна механизация, както и с последващите разходи за нейното натрошаване и смилане до определен размер;
- Осигуряване на **минимално замърсяване** между полезното изкопаемо и вместиращите скали, както между отделните типове и сортове руда.

D. Williams (1988) предлага няколко основополагащи подхода за решаването на проблема на замърсяването на рудата и откривката във взривения куп, като същевременно може да се запази или повиши производителността на открития рудник:

- използване на софтуерен модел за проектиране на взривните работи;
- използване на по-високо енергетични ВВ при извършваните взривни работи;
- детайлно проучване на скалните разновидности в масива с цел адекватно извършване на взривни работи;
- използване на точни системи за инициране с цел осигуряване на необходимите закъснения между взривните сондажи;
- търсене на подходи за получаване на по-добро разбиране на действието на взривните работи върху масива.

На базата на световния опит и немалкото случаи на реализирането на необосновани нива на загубите и обедняването действително е довело до въвеждането на ново разбиране за проблема на

локализирането на местоположението на рудата във взривения куп. Дефинират се два вида граници, които засягат местоположението на рудата в масива преди и след взривяването. В първия случай те се дефинират **като граници на рудните зони**, а във втория – ефектът на взривното отместване налага въвеждането на т. нар. **граници на добивния блок (dig lines)** (B. Poureau et al., 2019). Като общ принцип може да се изведе, че те рядко съвпадат по форма, размери и местоположение с първоначалните граници на рудния блок. Именно наличието на достоверна информация за състоянието на масива, начинът по който се извършват пробивно-взривните работи и селективният добив, както и резултатът от тяхното осъществяване, се явяват основополагащи за ефективно решаване на проблема по управление качеството на рудата.

1.2. Моделиране местоположението на полезното изкопаемо след взривяване

1.2.1. Същност на моделирането за целите на открития добив

С усложняването на научно-изследователската дейност през историята на човечеството моделирането като метод навлиза все повече във всяка област на човешкото познание и дори се превръща като един от основните методи за изучаване на обектите и явленията от действителността. Н. Стефанов (1970) посочва, че едно явление може да се разглежда като модел само ако е източник на нова информация за изследвания обект, както и когато моделът е по-достъпен за изучаване от оригинала. М. Янков (1984) извежда следното определение на понятието „модел“: **система, която съответства на друга система и я замества в процеса на нейното изследване.**

Методът на моделирането като един от основните научни методи се използва още от древността, като на базата на мисловни модели философите са се опитвали да обяснят физическите процеси. Л. Илиев (1986) разглежда моделирането като „**възпроизвеждане**“ **на характеристиките на даден обект върху друг обект, специално създаден за тяхното изучаване.** Авторът разглежда понятието като модел за описание на обекти, осъществено чрез езиково, графично или аналитично описание. Полученият модел представлява абстрактен обект и описва само някои от по-важните свойства на обекта-първообраз.

Известно е, че когато даден обект или явление са труднодостъпни или не е възможно самото явление да се изучи в натурален вид, моделирането се явява единственият валиден метод за неговото описание и опознаване. Моделиране се прилага и в случаите, когато непосредственото изучаване на явленията може да доведе до деформиране на получената информация. Към настоящия момент все по-широко навлиза компютърното моделиране на различни явления и процеси, като по този начин се разширява броя на изследваните варианти за проектни решения, както и се предотвратяват производствени аварии и нежелани ситуации, реализиращи негативни икономически последици.

1.2.2. Класификация на моделите за определяне местоположението на рудните зони след взривяване

В контекста на моделирането на взривното отместване, в зависимост от използваната методика за описание на динамиката на минната маса, се отличават следните подходи: 1) аналитични модели; 2) числени модели за симулиране на взривното действие; 3) числени модели за проследяване на резултата от взривното отместване; 4) числени модели за комплексно моделиране на резултата от взривното отместване.

Аналитични модели

Като цяло тази група модели сами по себе си се оказват недостатъчни за моделиране на действието на взрива, а още повече и резултатите на взривното отместване на скалните късове. От една страна комплексността на аналитичните методи ги прави практически неприложими без използването на специализирана изчислителна техника, а от друга страна пренебрегването на една част от елементите в системата води до получаването на съществено отклонение на изчислените резултати спрямо действителните.

Числени модели за симулиране на взривното действие

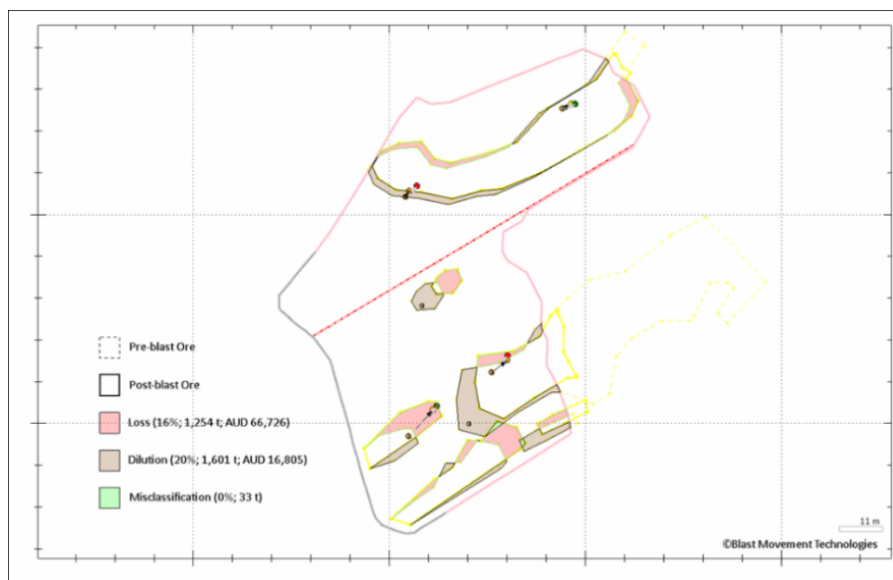
С развитието на компютърната техника голяма част от аналитичните подходи са доразвити и включени в изчислителните алгоритми на специализирани софтуерни продукти. При използването на симулационен подход за отчитане на отместването на скалната маса са разработени множество алгоритми, най-успешни от които са UDEC (Universal Distinct Element Code), 3DEC, CAROM (CAlculated ROck Motion), BLOCKS, BUMP, DMC (Distinct Motion Code) и HSBM (Hybrid Stress Blast Model).

На база на проучените литературни източници може да се заключи, че симулационните модели все още са в ранен стадий на развитие, но в обозримото бъдеще те биха могли да имат сериозен успех за точното локализиране на рудните зони след взривяване. Понастоящем тяхното приложение като елемент от системата за управление на качеството на руда не е напълно обосновано. Поради тази причина е необходимо пренебрегването на част от елементите на разглежданата система и съсредоточаването върху основният аспект от общия проблем за управление на качеството, а именно намаляване на загубите и обедняването чрез измерване на взривното отместване.

Числени модели за проследяване на резултата от взривното отместване

Тази група методи се базират до голяма степен на емпирични данни, получени от заснемането на отделни характеристики на самия процес на взривно отместване или неговия краен резултат. Първоначалните методи за проследяване на местоположението на рудата след взривните работи включва използването на цветно боядисани скални късове, тръби, вериги, метални топки от мелниците, чували пълни със стерилна скала, метални кутии, флагове и т.н. До началото на 21-ви век тези методи бележат значително подобрене и са станали едни от най-използваните в целия свят. Най-надежден, точен и предпочитан метод при определянето на местоположенията на рудните зони и изследването на динамиката на отместването на скалната маса при взривните работи се явява методът на използването на предаватели, излъчващи радио сигнал. През последните 15 години т. нар. **датчици за проследяване на взривното отместване (blast movement monitors - BMM)** започват широко да се прилагат в света в рудници, добиващи по-скъпо струващи метални руди (Au, Ag, Pt, U) и се отличават с голяма точност на информацията за движението на взривяваната скална маса. Системата за мониторинг на скалното отместване (Blast Movement Monitoring) е разработена в Университета в Куинсланд (University of Queensland) с лиценз, носещ името Blast Movement Technologies (понастоящем собственост на Hexagon). Системата се състои от предаватели на радиосигнал, които се намират в сферична PVC обвивка, предпазващи предавателя от механично увреждане. Поставянето на датчиците се извършва в специални мониторингови сондажи, които се засипват със забивка. Всеки от мониторинговите сондажи е разположен между взривните сондажи, като изборът на местоположенията за сондажите за BMM предаватели и техния брой се определя от формата на взривявания блок с определено съдържание с цел проследяването на отместването в специфични зони на взривяваното поле. Рудните зони преди да бъдат отбити се представят като съвкупност от вдлъбнати или изпъкнали полигони по съществуващия блоков модел. Материалът извън полигоните се приема за минен отпадък. След отбиването на скалната маса те са откривани със специален приемник. Постъпилите данни от него се обработват посредством специализиран софтуер и се изчислява местоположението и формата на новите рудни полигони. При методиката на BMT формата на рудните полигони се приема за тъждествена с тази на добивния блок (фиг. 1.14).

Щрихованите зони обозначават обемите от минна маса, които представляват избегнатите загуби и избегнатото обедняване в случая, че ефектът на взривното отместване е пренебрегнат и старите граници на рудния блок се приемат за граници на добивния блок. Изчисляването на икономическия ефект от използването на технологията се базира на метода на финансовите потоци, като на обемите, обозначаващи щрихованите зони, са съпоставени техните финансови стойности като потенциални печалби от реализирането на концентрата, получен от рудата с определено извлекателно количество метал. Точната методика на изчисление е обект на търговска тайна.



Фиг. 1.14. Принципна схема на отместването на взривяваната скала и разположение на BMM датчиците (no blastmovement.com)

На базата на множеството направени изследвания в сферата на взривното отместване посредством BMM датчиците, както твърди D. Thornton (2009), е позволило за пръв път да бъдат акумулирани повече и по-точни данни. Според нея това е довело до валидирането на резултатите, получени от пасивните техники за наблюдение, както и е позволило да се получат по-точни данни и по-добро разбиране за отместването в тримерното пространство. **Най-важният принос от приложението на BMM технологията е, че подходът е довел до излизането от парадигмата на кинематичния подход, прилаган при създаването на симулационни модели.**

Независимо от възможността за получаване на добри резултати, съществуват няколко предпоставки, при които могат да възникнат грешки при управлението на качеството, от гледна точка на наличната информация, използвана при създаването на модела на отместените рудни зони:

- Неоптималност при създаването на рудните полигони и оставянето на малки изолирани полигони – в този случаи те често биват пренебрегвани и отчитането на тяхното отместване е косвено, базиращо се на датчици в близост до други полигони;
- Непълното отчитане на вертикалното отместване в предложената от BMT методика за изчисляване на избегнатите загуби и обедняване;
- Пренебрегването на ефекта на вертикално отместване на нивата на подстъпалата при определяне на границите на добивните блокове.

Въпреки изброените недостатъци, в световния опит се счита, че използването на BMM датчиците представлява водещ метод за проследяване и моделиране на взривното отместване.

Числени модели за комплексно моделиране на резултата от взривното отместване

Тази група методи до голяма степен разчитат на емпиричните данни, получавани от BMM датчиците, като те прилагат комплексни числени модели за преодоляването на недостатъците на методика на BMT за определяне на границите на добивните блокове. Интерес будят и разработките Isaaks и Hadeyani (2014), Y. V. Vasylychuk и C. V. Deutsch (2019) и B. Poupeau, W. Hunt и D. La Rosa (2019). Те разглеждат приблизителни подходи за моделирането на процеса на отместването на взривената скална маса посредством маркшайдерско заснемане на стъпалото преди взривяване и заснемане на получения взривен куп, както и чрез използване на BMM технологията използват блоков модел на полето преди и след взривяването. Характерно за моделите, използващи комплексни математически методи за моделиране на резултата от взривното отместване, е че при тях се обособяват три задачи, решението на които е отправна точка за решаването на следващата: 1) установяване на местоположението на рудните зони във взривения куп; 2) определяне на оптималната по даден критерий граница на добивния

блок; 3) определяне на оптималната по даден критерий посока за изземване на материала от забоя. Иновативен се оказва подходът, приложен в изследванията на Z. Yu и др. (2019, 2020, 2020, 2021), които използват изкуствен интелект за прогнозиране на хоризонталния вектор на отместването, на чиято база се създава векторното поле на отместването.

Като общ извод, който е валиден за всеки от изброените модели, попадащи в групата на числените модели за комплексно моделиране на взривното отместване, е, че те са силно чувствителни към аномални стойности в емпиричните данни, което би довело до изкривяване на цялостното моделирано решение. Въпреки това използването на комплексни числени модели за прогнозиране на векторното поле на взривното отместване и търсенето на методи за подобряване на тяхната точност се оказва изключително перспективно.

1.3. Изводи

На база на проучените литературни източници могат бъдат посочени следни по-важни теоретични изводи, въз основа на които се разви текущото изследване:

1. Управлението на качеството на рудата е изключително сложен проблем и за неговото решаване е необходимо обособяването на отделни подзадачи, изискващи прилагането на интердисциплинарен подход.
2. При открития добив задължително условие се явява прилагането на числено моделиране на взривното отместване за намаляване обедняването и загубите на руда.
3. Задачите, които се решават въз основа на даден модел на взривното отместване, включват: 1) моделиране местоположението на рудните зони след взривяване; 2) определяне на оптималните контури на добивните блокове по даден критерий; 3) определяне на оптимална посока на изземване на рудните зони по даден критерий.
4. Подходът, чрез който може да се извърши численото моделиране на взривното отместване, трябва да бъде комплексен. Същевременно приложението на модела трябва да отговаря на промишлените нужди на открития рудник и произтичащите условия за точност и ресурсоемкост на модела по време, информация, финансови средства и труд.
5. За моделирането на взривното отместване е необходимо да се отчетат както фундаменталните принципи на взривното разрушение на структурно нарушена среда (скален масив), така и специфичните закономерности на взривното отместване за конкретиката на даден рудник, които могат да бъдат изведени единствено по емпиричен път.
6. За промишлени условия в съставения модел трябва да се пренебрегнат част от параметрите на взривното разрушение, като се изходи от икономическите ограничения в една производствена система за мероприятията по осигуряването на емпирични данни.
7. За получаването на емпирични данни за естеството на взривното отместване най-надежден подход се явява използването на BMM датчици, създадени от Blast Movement Technologies, поради което те са най-масово прилагани в откритите рудници.
8. Описаният от BMT подход за определяне на границите на добивните блокове не е най-точен в сравнение с по-новите разработени модели, но представлява добро тяхно приближение.
9. Перспективно се оказва създаването на блоков модел за оценка на разпределението на съдържанието на рудата във взривения куп. От практическа гледна точка има бъдеще създаването и прилагането на модели, базирани на изкуствен интелект, които прогнозират векторните характеристики на отместването.
10. Не е използван голяма част от потенциала на известни и доказали се статистически методи, намерили приложение в други научни области, въпреки наличието на значителен обем от изследвания на взривното отместване.
11. По-малко е засегнато моделирането на взривното отместване като превантивен подход за коригиране на параметрите, участващи в паспорта на ПВР, както и за разглеждането на различни конфигурации на поставянето на BMM датчиците.
12. Не напълно са разгледани възможностите за приложението на методите за машинно обучение за прогнозиране на векторните характеристики на отделните вектори във векторното поле на отместването.

Като основен извод може да се посочи, че в съвременен план, независимо от възприетия подход, ключова роля при моделирането на местоположението на полезното изкопаемо след взривяване има приложението на ВММ датчици за получаването на емпирични данни за взривното отместване. Освен това въпреки съществуващите общи правила, изведени от ВМТ, не съществува ясна методика, която да аргументира защо поставянето на даден ВММ датчик в определени места на масива е целесъобразно. Създаването на методика, базирана на количествени критерии, би могла по-точно да определи кои зони са приоритетни за проследяване. Освен това по този начин може да се намали и рискът от изкривяване на информацията за действителното отместване и респективно, да се намали рискът от компрометиране на решенията, предоставяни от числените модели на ВМТ, OrePro 3D, Isaaks и др. (2014), Vasylichuk и Deutsch (2019), както и бъдещите създавани модели в това направление. Наличието на прогностичен модел би дал възможността за изследване на самото явление преди неговото настъпване. По този начин, от една страна, могат да се определят рационалните зони за поставяне на ВММ датчиците, а от друга – до получаването на по-пълна картина за векторното поле на взривното отместване посредством генерирането на изкуствени вектори освен физически установените. Именно върху тези два аспекта на моделирането на местоположението на полезното изкопаемо след взривяване е фокусиран настоящият труд.

ГЛАВА 2. МЕТОДИКА НА ДИСЕРТАЦИОННОТО ИЗСЛЕДВАНЕ

II.1. Цел и задачи на изследването

Целта на изследването е да се повиши качеството на рудата при открит добив на полезни изкопаеми чрез използване на числени модели, служещи за прогнозиране местоположението на полезното изкопаемо след взривяване.

Основни задачи:

1. Разработване на теоретичните основи на изследвания проблем;
2. Разкриване на общи закономерности на отместването при взривяване;
3. Установяване на зависимости между взривното отместване и индивидуалните особености на средата около даден ВММ датчик;
4. Установяване на приоритетните за проследяване при отместването рудни зони.
5. Създаване на числен модел за прогнозиране на местоположението на рудата във взривения куп;
6. Доказване на икономическия ефект от прилагането на числените модели.

II.2. Предмет и обект на изследването

Предмет на изследването е моделирането на местоположението на полезното изкопаемо след взривяване.

Обектът на изследването е качеството на рудата при открития добив на полезни изкопаеми след извършването на взривни работи.

II.3. Използвани методи на изследване

За постигането на целта и решаването на основните задачи на научното изследване е приложен комплекс от методи, който включва:

1. Проучване и анализ на научни и специализирани литературни източници;
2. Наблюдение;
3. Беседа;
4. Измерване на основните фактори, влияещи върху взривното отместване и качеството на рудата;
5. Методи за математико-статистическа обработка на резултатите от изследването;
6. Методи за статистическо моделиране;
7. Методи за машинно обучение;
8. Методи, разработени за целта на изследването.

Съществуват изключително голям брой фактори, свързани в една или друга степен с качеството на рудата. Една част от тях не оказват съществено влияние върху него. На базата на предварителен анализ и синтез на значителен брой показатели се идентифицират основните фактори, непосредствено свързани с формирането на качеството на рудата при взривното отместване. Те включват:

Зависимости между векторните компоненти на взривното отместване, получени от използването на ВММ датчици (M_{3D} , M_H , M_{H-ff} , M_{H-dev} , α_H , M_V , α_V , H_e):

1. Дълбочина на поставяне на датчика (ID);
2. Вид на използваното ВВ (ET);
3. Вид на взривяването (BP);
4. Тип на скалните разновидности (RT);
5. Наличието на каверни във взривяваните полета (CP);
6. Климатични условия (ST);
7. Комплексни показатели, отчитащи индивидуалните особености на средата около всеки ВММ датчик

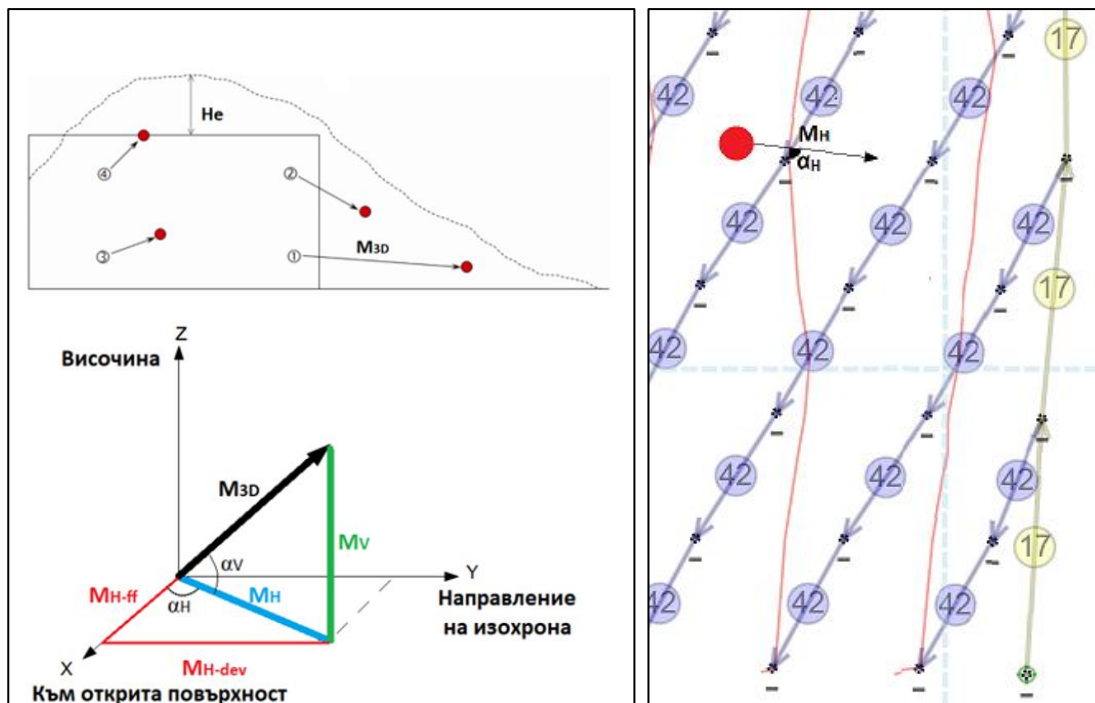
Зависимости между векторните компоненти на взривното отместване, получени от използването на ВММ датчици

За настоящото изследване данните за взривното отместване са генерирани като отчет от софтуерния продукт BMM Explorer, като те са съхранявани в специален регистър на векторите на отместването за всяко от предходните взривявания. Всеки тримерен вектор на движението може да се опише като комбинация от три независими променливи – хоризонтална компонента, посока на отместване и вертикална компонента. Параметърът, обозначаващ ъгъла на отклонение от хоризонталното направление (α_H), първоначално не присъстваше в отчета и беше изчислен като разликата между посочения ъгъл на перпендикуляра към изохроните пред даден ВММ и посочения ъгъл на вектора на движение. За целите на това изследване изохроните бяха генерирани посредством софтуера O-Pitblast. По този начин алгебричната мярка на хоризонталното отместване към открита повърхност (M_{H-ff}) и алгебричната мярка на отклонението на хоризонталното движение (M_{H-dev}) се въвеждат като компоненти на вектора на хоризонталното движение. Техните стойности могат да се изчислят чрез стойността на дължината на хоризонталния вектор на отместването (M_H):

$$M_{H-ff} = M_H \cdot \cos \alpha_H \quad (2.1)$$

$$M_{H-dev} = M_H \cdot \sin \alpha_H \quad (2.2)$$

За описанието на случайния характер на движението на скалите, предизвикано от взривяване, може да се използва една от следните комбинации за всеки тримерен вектор на движение: (M_H , M_V , α_H), (M_{H-ff} , M_{H-dev} , M_V) или (M_{3D} , α_V , α_H), където α_V е ъгълът на западане на вертикално движение, а M_V е алгебричната мярка на вертикалния вектор на отместването. В настоящото изследване се използват всичките 7 променливи на движението, за да се установи как всяка от тях се влияе от взривяването. Освен това в този анализ е въведен и ефектът на разбухването при различни условия посредством показателя H_e . Параметърът се измерва като разлика между височините на стъпалото преди взривяване и на взривения куп. На фиг. 2.1 са илюстрирани наблюдаваните параметри на взривното отместване.



Фиг. 2.1. Илюстрация на компонентите на взривното отместване

Комплексни показатели, отчитащи индивидуалните особености на средата около всеки ВММ датчик

Въз основа на техническата документация, приложена към паспортите на ПВР, са изведени допълнителни параметри за всяко от изследваните взривявания. Изхождайки от трудовете на V.

Vasylchuk и С. Deutsch (2019), Z. Yu и др. (2021), както и използваните от тях показатели, въведените променливи в това изследване целят да се получи еднозначно описание на конкретните условия, в които се намира всеки датчик. На тази база се въвеждат локални за неговото местоположение показатели, включващи:

- локално разстояние между взривните редове (LB), m;
- локално разстояние между сондажите в ред (LS), m;
- средна локална дължина на преудълбаването ($\overline{(LJ)}$), m;
- средна локална дължина на забивката ($\overline{(LT)}$), m;
- средна локална височина на стъпалото ($\overline{(LH)}$), m;
- коефициент, обозначаващ отношението между $\overline{(LJ)}$ и LB (LKJ);
- коефициент, обозначаващ отношението между $\overline{(LT)}$ и LB (LKT);
- коефициент, обозначаващ отношението между $\overline{(LH)}$ и LB (LKH);
- коефициент, обозначаващ отношението между LS и LB (LKS);
- разстояние между датчика и фронталната открита повърхност (D_{ff});
- разстояние между датчика и края на взривното поле по посока обратна на взривното отместване (D_{bf});
- разстояние между датчика и фланговата повърхност спрямо посоката на взривното отместване (D_{fl-f});
- разстояние между датчика и крайната флангова повърхност на взривното поле по посока обратна на взривното отместване (D_{fl-b});
- коефициент, обозначаващ близостта на датчика до фронталната открита повърхност по посока на взривното отместване (K_{ff});
- коефициент, обозначаващ близостта на датчика до флангова повърхност по посока на взривното отместване (K_{fl-f});
- локален относителен разход на BB (LPF), kg/m³;
- локален обем отделяни газови продукти на 1m³ взривена скална маса (LGP), l/m³.

На фиг. 2.3. са обозначени показателите LB, LS, LJ, LT, LH, D_{ff} , D_{bf} , D_{ff-s} и D_{bf-s} .



Фиг. 2.3. Локални показатели, обозначаващи индивидуалните особености на взривното поле около ВММ датчиците

Посочените показатели са включени в изследването за постигането на две основни цели: 1) установяване на общите закономерности на взривното отместване и 2) изследване влиянието на комплекса от специфични условия върху отместването на ВММ датчиците.

Първите анализи включват векторните параметри, получени от емпиричните данни при проследяване на ВММ датчиците: M_{3D} , M_H , M_{H-ff} , M_{H-dev} , α_H , M_V , α_V и H_e . Анализира се всеки един от тях с цел установяването на най-подходящите показатели за моделиране на взривното отместване. Освен тях са включени още и номиналните променливи FL , CP , BP , DT , ST и ET за установяването на тяхното въздействие върху осемте променливи, отчитащи взривното отместване.

При вторите анализи се разглеждат по-малко на брой наблюдения (150 броя), като за целта е използвана представителна извадка. Освен векторните данни и посочените номинални променливи са включени още и локалните за всеки датчик променливи, в т.ч. ID , LB , LS , $\overline{LJ}$, $\overline{LT}$, $\overline{LH}$, LK_H , LK_L , LK_T , LK_S , D_{ff} , D_{ff-f} , K_{ff} , K_{ff-f} , LPF и LGP .

На таблица 2.1 са представени стойностите, които приемат номиналните и булевите променливи, използвани за систематизиране на наблюденията.

Таблица 2.1. Легенда на използваните номинални променливи

Параметър	Обозначение	Стойности
Ниво на подстъпалото	FL	1 – Горно подстъпало 2 – Долно подстъпало
Вид взривно вещество	ET	1 – нафтоселитрено ВВ 2 – патронирано ВВ тип „слари“
Вид на междинния детонатор	DT	1 – TNT тип „Ели“ 2 – лят бустер 3 – патронирано ВВ тип „слари“
Наличие на буфер	BP	0 – Взривяване с открита повърхност 1 – Буферно взривяване
Наличие на каверни	CP	0 – над 5 m 1 – до 5 m
Тип скала	RT	1 – Метаморфозирали класти и глини 2 – Брекчо-конгломерати 3 – Алевролит с високо съдържание на кварц
Сезон	ST	1 – Пролет 2 – Лято 3 – Есен 4 – Зима

II.3.4. Методи за обработка на информацията

За обработка на емпиричните данни от използването на ВММ-технологията бяха използвани различни математико-статистически методи включващи: 1) вариационен анализ, 2) сравнителен анализ, 3) корелационен анализ и 4) регресионен анализ. Тези методи са адаптирани към спецификата на изследвания проблем.

II.3.5. Компютърно моделиране

Методи за статистическо моделиране

Използваните методи за статистическо моделиране в настоящия труд включват прилагането на подходяща копула за генериране на произволен брой случайни числа, следващи показателите на дадено емпирично разпределение за изследван показател. Самият модел копула представлява кумулативна функция на разпределение на няколко променливи. Архимедовите копули активно се използват за моделиране на зависимостите между произволни променливи и поради тази причина често намират приложение във финансите, медицината и в инженерните науки, включително и при моделирането на

взривното отместване (Hmoud & Kumral, 2021; Hmoud & Kumral, 2022). В настоящия дисертационен труд са използвани две копули – на Clayton за моделиране на зависимостта между отместването на двете подстъпала и копула на Frank за моделиране на взаимовръзката между отклонението спрямо основната компонента на хоризонталния вектор (перпендикуляра към изохроните). Копулата на Clayton се явява по-подходяща за асиметрично разпределени променливи, а копула на Frank е приета като най-подходяща при моделирането на разпределения с по-малка асиметрия от петте най-често прилагани (на Clayton, на Frank, на Gumbell, на Ali–Mikhail–Haq, на Joe).

Методи за машинно обучение

В съвременен план методите за машинно обучение представляват мощно средство, което служи за решаване на два типа прогностични задачи – класифициране на данни по даден признак и търсенето на регресионна зависимост между определени параметри и един или повече целеви показатели. В инженерната практика на взривните работи в открития добив, използването на методи за машинно обучение се оказва оправдано, тъй като те успешно са приложени при прогнозиране на зърнометричния състав на скалните късове (Li et al., 2021), техния разлет (Lu et al., 2019), сеизмичния ефект от взривни работи (Huang et al., 2020), включително и взривното отместване (Yu et al., 2020).

Към използваните методи за машинно обучение са включени: изкуствени невронни мрежи (многослоен перцептрон), машина на опорните вектори, регресионни дървета (алгоритъм XGBoost). Трите подхода за машинно обучение са използвани за създаването на три отделни модела за прогноза на дължината на хоризонталния вектор на отместването. Въз основа на прилагането на изпитани методи за валидация се проверява устойчивостта на моделите и способността им да работят ефикасно в реална среда при други стойности на входните променливи, които не са били използвани за обучението на модела. За тази цел извадката е разделена на случаен принцип на две части – тренировъчна и тестова извадка. Най-често използваните съотношения между двете извадки са 80/20 или 70/30 (Yu et al., 2020; Yu et al, 2021; Li et al., 2021). Тренировъчната извадка служи за обучаване на модела посредством трите описани метода за машинно самообучение и тя служи единствено за тази цел. Тестовата извадка служи единствено за получаването на реална оценка на представянето на модела в „непозната“ среда и на тази база може да се оцени неговата реална перспектива за бъдещо развитие и приложение в промишлени условия.

За оценка на представянето на трите модела са използвани статистически показатели, служещи за даването на количествена оценка на прогнозираните стойности на хоризонталното отместване спрямо действителните: коефициент на детерминация (R^2), средна абсолютна грешка (MAE) и корен от средноквадратично отклонение (RMSE). Изчислението на показателите се извършва по следните формули (Yu et al., 2019):

$$R^2 = \frac{(n \sum_{i=1}^n T(x_i) \cdot x_i - \sum_{i=1}^n T(x_i) \cdot \sum_{i=1}^n x_i)^2}{[n \sum_{i=1}^n T(x_i)^2 - (\sum_{i=1}^n T(x_i))^2] \cdot [n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2]} \quad (2.35)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (T(x_i) - x_i)^2 \quad (2.36)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (T(x_i) - x_i)^2} \quad (2.37)$$

където x_i – действителна стойност;

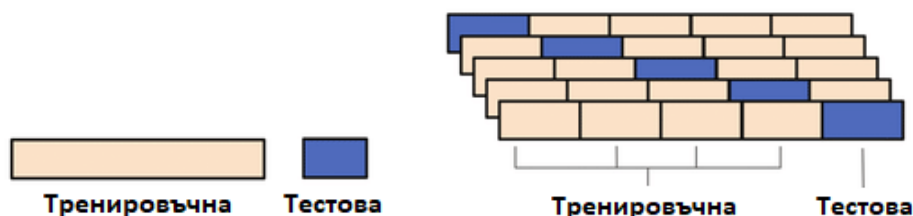
$T(x_i)$ – прогнозирана стойност;

i – пореден номер на стойностите;

n – брой наблюдения.

Получените резултати за всеки от методите са представени в таблична форма. На базата на най-високите получени резултати за R^2 , както и същевременно за най-ниските резултати за MAE и RMSE, се избира най-подходящия модел като е оценено и неговото ниво на приложимост за бъдещи изследвания и използване в промишлени условия.

Известни са и други по-строги подходи за оценка на прогностичната точност на създадените модели, от които най-широко прилагана е k-степенната крос валидация при типични стойности $k=3$, $k=5$ или $k=10$. Същността на този подход за валидиране се състои в това да се оценят посочените показатели при k-кратно разделяне на данните на тренировъчна и тестова извадки за получаването на осреднена оценка на точността на алгоритмите на база посочените показатели. На фиг. 2.10 е представени отделните извадки при двата подхода.



Фиг. 2.10. Обикновено разделяне на данните на две извадки (Train/Test split) (ляво). 5-кратно разделяне на данните за крос валидация (5-fold CV) (дясно) (по Mathai et al., 2020)

Геостатистически методи

Геостатистическите методи са широко използвани за решаването на инженерни задачи в маркшайдерството и геологията при търсенето на количественото разпределение на даден признак, напр. надморска височина или съдържание на метал. Изхождайки от опита на D. Taylor и I. Firth (2003), геостатистически методи са приложени и за прогнозирането на хоризонталния вектор във векторното поле на отместването. При интерполирането на съдържанията на полезния компонент, съдържащ се в рудата по краен брой точкови наблюдения най-предпочитани се оказват видовете кригинг (Hustrulid et al., 2013). За настоящия труд са използвани три геостатистически метода – метод на Shepard (IWD), универсален кригинг и кокригинг.

Метод Shepard (IWD)

Методът представлява детерминиран подход за пространствена интерполация на базата на краен брой точкови наблюдения на даден показател. Методът се базира на схващането, че даден изследван признак е повлиян най-силно от най-близките точкови наблюдения, за разлика от тези, които са на по-голямо разстояние от дадена точка, за която се търси неговата стойност (Shepard, 1968).

На фиг. 2.11 е показана принципна схема на изчисление по метода.



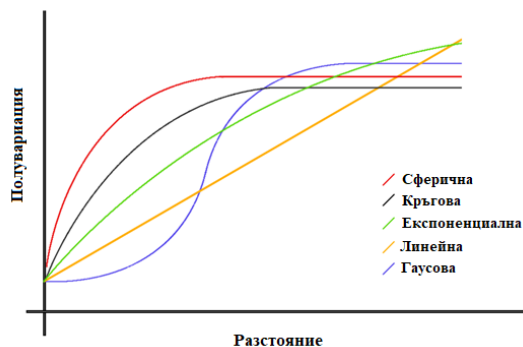
Фиг. 2.11. Принципна схема на приложението на метода на Shepard

Източник: <https://www.aspexit.com/spatial-data-interpolation-tin-idw-kriging-block-kriging-co-kriging-what-are-the-differences/>

Кригинг

Кригингът представлява един от най-мощните геостатистически методи за търсене на пространствена корелация между краен брой наблюдения на даден признак в пространството. В зависимост от вида на използваната мрежа за наблюдения в пространството са известни случаен, точков, непрекъснат и универсален кригинг, които се считат за основополагащи (Matheron, 1963). При кригинга се създава т. нар. полувариограма, върху която се нанасят разликите между отделните наблюдения на изследвания признак между две произволни точки (по вертикалната ос) и тяхното разстояние (хоризонталната ос). За получените точки в координатната система се търси подходяща

известна аналитична функция, която най-добре да опише вариацията между наблюденията (Burrough, 1986) (фиг. 2.12).



Фиг. 2.12. Принцидна схема на приложението на метода кригинг

Източник: <https://gisgeography.com/kriging-interpolation-prediction/>

Трите основни параметъра на функцията, използвана за описание на пространствената корелация между наблюденията са ранг на влияние (lag), ефект на включенията (nugget) и праг (sill).

При обикновения кригинг се приема, че съществува неизвестна стойност на средната величина на прогнозирания признак за дадена околност на точката s_0 . Този метод е най-широко използваният от различните видове кригинг.

При универсалния кригинг се приема, че съществува преобладаваща тенденция между самите данни, която може да бъде моделирана с детерминистична функция – полином или друг тип функция. Самият полином се получава въз основа емпиричните данни и автокорелацията се получава въз основа на случайните грешки. При напасване на модела по случайните грешки се включва и избраната функция за получаването на по-подходящи резултати.

II.3.6. Разработени модели за целта на изследването

Тъй като информацията, получавана за взривното отместване на базата на няколко ВММ датчика е оскъдна за интерполиране или екстраполиране на векторните характеристики на цялото поле, то е необходимо създаването на методика за идентифицирането на тези зони, които се оказват най-целесъобразни за наблюдение. Това важи в случая ако продължи да се използва настоящият еталонен модел на ВМТ. Крайният брой ВММ датчици, които могат да бъдат вложени в едно взривявано поле води до търсенето на максимално точна обосновка за поставянето им в дадени зони на полето. Като цяло проблемът се свежда не само до определянето на броя датчици, необходими за получаването на представителна и достоверна информация относно отместването на скалната маса и новото разположение на рудните зони след взривяване, но и до определянето на техните най-подходящи места.

Целите, които трябва да бъдат изпълнени при разполагането на датчиците следва да бъдат свързани с поставянето им възможно най-близо до рудните зони. По този начин се намалява грешката при определянето на отместените граници на рудните зони и следователно води до намаляването на загубите и обедняването при изкопно-товарните работи, които следват по-точно определените граници на отместване за рудата. Практически не е икономически изгодно и възможно на този етап да бъде измервано отместването по цялата площ на взривявано поле, което води до избирането на краен брой местоположения за поставянето на датчиците, които да предоставят достатъчно достоверна и представителна информация за отместването на границите на рудните зони в рамките на взривената скала. Въпреки изведените насоки, задачата за определянето на приоритетните зони не е лесна, тъй като не съществуват количествени критерии. На тази база са изведени три апроксимиращи подхода за определяне на най-приоритетните за проследяване рудни зони: 1) статичен подход; 2) динамичен подход; 3) подход, базиран на комплексно моделиране.

Статичен подход за първа апроксимация

Първият подход се базира на коефициента ψ на Ломоносов, изразяващ сложността на формата на дадено рудно тяло, който е адаптиран за нуждите на оперативните работи и по-конкретно при извършването на ПВР. Неговата същност се състои в това, че се извежда безразмерна величина,

отчитаща сложността на формата на дадено тримерно тяло. За нуждите на изследването коефициентът е модифициран (ψ'), като се използва околната повърхнина на рудния блок в ненарушения масив (след приемането на определена форма на границите за рудната зона по блоковия модел), отнесен към неговия обем:

$$\psi' = \frac{\sqrt{S_P}}{\sqrt[3]{V_P}} \quad (2.41)$$

където S_P - околна повърхнина на рудния блок, изразяваща неговите контактни зони с вместващите скали, m^2 ;

V_P – обем на рудния блок, m^3 .

На тази база може да се получи оценка за сложността на формата на всеки руден блок. Допуска се, че колкото по-сложна е геометричната форма на даден руден блок, толкова е по-вероятно границите му след взривяване да бъдат нарушени и на тази база да се реализират по-голям процент загуби и обедняване при по-трудното разграничаване на кондиционната руда от некондиционната в нарушените контактни зони. Коефициентът ψ' се изчислява за рудните зони от двете подстъпала. Освен него, на всяка рудна зона по метода на финансовите потоци се изчислява потенциалната печалба на база извлеканото количество на полезния компонент, съдържащо се в него. С цел постигането на съпоставимост на резултатите между модифицирания коефициент на Ломоносов и извлеканата печалба за рудните зони (OP), те са стандартизирани за отделните рудни зони. Двете стандартизирани величини се използват за анализ на двойките резултати в абстрактно двумерно пространство. На базата на разстоянието между всяка точка в координатната система и нейното начало се ранжират отделните полигони, като най-нисък ранг (бал) получава този полигон с най-голямо разстояние от началото на координатната система. Използвани са зависимостите:

$$OP_{sti} = \frac{OP_i}{OP_{max}} \quad (2.42)$$

$$\psi'_{sti} = \frac{\psi'_i}{\psi'_{max}} \quad (2.43)$$

$$R_i = \sqrt{OP_{sti}^2 + \psi'_{sti}^2} \quad (2.44)$$

Отделните полигони се ранжират по стойността на ранга R както за цялото стъпало, така и за двете подстъпала поотделно, като полигоните, получили по-високи стойности на ранга, са по-приоритетни за проследяване.

Динамичен подход за второ приближение

Подходът се основава на методите на статистическо моделиране, като въз основа на достатъчно натрупан емпиричен материал за решаване на задачата в двумерното пространство е необходимо намирането на възможно най-доброто приближение на разпределението на две от двойките променливи (M_H, α_H), (M_{H-ff}, M_{H-dev}), (M_{H-ff}, α_H) или (M_{H-dev}, α_H). Посредством критерия на Kolmogorov-Smirnov се проверява разпределението на емпиричните данни за конкретиката от условията, за които се прилага подходът. За целта се използват набор от познати в инженерната практика разпределения (на Вейбул, гама, бета и др.). Освен това за всеки от показателите се установява коефициента на корелация между величините на неговите реализации за горното и долното подстъпало чрез коефициента на корелация. След откриването на разпределението, представляващо най-добро приближение и установяване на корелационните коефициенти, се използва даден вид Архимедова копула за генериране на голям брой случайни числа, следващи установените разпределения на две от величините M_H, α_H, M_{H-ff} и M_{H-dev} за горното и долното подстъпало. Случайно генерираните числа се приемат за вектора на отместването, като самото отместване за всяка рудна зона се реализира с обикновено транспиране на всяка от точките на рудния полигон в двумерна проекция. Това не представлява най-точният способ на имитационно

моделиране на взривното отместване, но за целите на задачата за определяне на приоритетните зони то се явява достатъчно опростено, за да могат да бъдат разгледани по-голям брой итерации. Следвайки методиката на S. Zhang (1994), разликата в обемите на рудната зона в плътно и разбухнало състояние представлява:

$$\Delta V = H'(S_{ore} + S_1) - H(S_{ore} + S_2) \quad (2.45)$$

където H' – височина на взривения куп в областта на полигона, m;

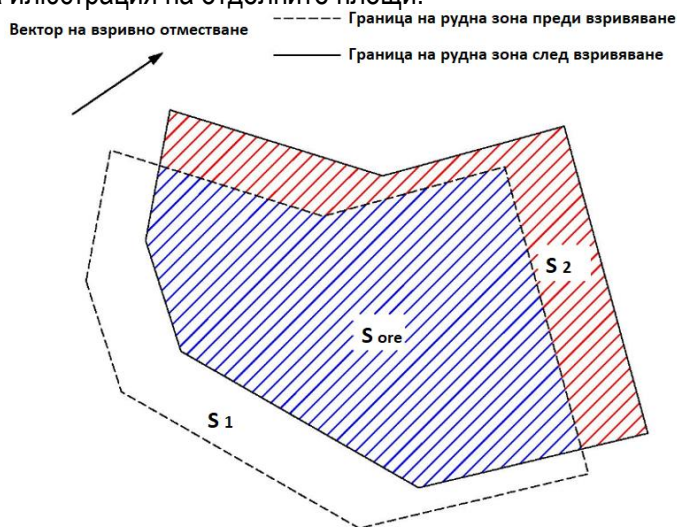
H – височина на стъпалото след взривяване, m;

S_{ore} – площ на добиваната руда, m²;

S_1 – площ на минния отпадък, попадащ в добивния блок, m²;

S_2 – площ на рудата третирана като откривка (при пренебрегване на взривното отместване), m².

На фиг. 2.13 са представена илюстрация на отделните площи.



Фиг. 2.13. Илюстрация на отместването при използване на транспиране за намиране на местоположенията на рудните зони след взривяване

За втората итерация е прието допускането на S. Zhang (1994), че площта на полигона преди и след взривяването е равна ($S_1=S_2$). Оттам равенството може да се сведе до следната опростена форма:

$$\Delta V = \Delta H \cdot S \quad (2.46)$$

където ΔH – разликата между височината на стъпалото и взривения куп (в настоящото изследване приета за H_e), m;

S – площта на рудния полигон преди взривяването, m².

Равенството важи в по-голяма степен за рудни зони, намиращи се в централната част на взривяваното поле, за които разбухването е във вертикална посока, в случай че се използва диагонална схема на свързване. Въпреки съществуващата разлика между двата обема, тяхната маса остава константна. Следвайки зависимостите на S. Zhang (1994), равенството се трансформира до вида:

$$S_{ore} \cdot H \cdot \rho = S_{ore} \cdot H' \cdot \rho' \quad (2.47)$$

където ρ – обемна плътност на скалата в плътно състояние, t/m³;

ρ' – насипна плътност на скалата в разбухнало състояние след взривяване, t/m³.

При преобразуване на горното равенство е валидна зависимостта $H'/H = \rho/\rho' = K_p$, където K_p е коефициентът на разбухване на материала. За улесняване на изчислителните операции за приетия подход, са приети допусканията и произтичащи от тях зависимости, установени от S. Zhang (1994).

Изчисляването на загубите и обедняването при идеални условия и по възприетия подход се трансформират до равенствата:

$$P_{OD} = \frac{S_1}{S_1 + S_{ore}} \quad (2.48)$$

$$P_{OL} = \frac{S_2}{S_2 + S_{ore}} \quad (2.49)$$

Разликата между отчитането и пренебрегването на взривното отместване може да бъде отчетена посредством показателя избегнати икономически загуби (AEL) за всеки руден полигон. След заместване и опростяване, неговото пресмятане се осъществява по следната формула:

$$AEL = H' \cdot \rho' \cdot [E_{BMM}(S_2 + S_{ore}) - E(S_1 + S_{ore})] = H \cdot \rho \cdot 0,01 \cdot \alpha \cdot S_2 \cdot (1 - P_{OL}) \cdot \varepsilon \cdot P_{Au} \quad (2.52)$$

Изчисляването на показателя е аналогично на изчисляването на показателя щети, използван от Г. Константинов (1997).

В този случай показателите за установяване на ранга на всеки руден полигон i от общо N полигона са три: *среден процент на избегнатите загуби по руда* ($\bar{P}_{AOL}$), *коefficient на вариация на загубите по руда* ($K_{var-AEL}$) и *средните избегнати икономически загуби* ($\overline{AEL}$). Те се изчисляват по формулите:

$$\bar{P}_{AOL} = \frac{\sum_i^N \frac{S_{2i}}{S}}{N} \quad (2.53)$$

$$\overline{AEL} = \frac{\sum_i^N 0,01 \cdot \alpha_{Au_i} \cdot H \cdot \rho \cdot S_{2i} \cdot (1 - P_{OL}) \cdot \varepsilon \cdot P_{Au}}{N} \quad (2.54)$$

$$K_{var-AEL} = \frac{\sigma_{AEL}}{\overline{AEL}} \quad (2.55)$$

където ε – извличане на метала при обогатяване, %;

α_{Au_i} – съдържание на злато в балансовите запаси за i -ти руден полигон, g/t;

P_{Au} – цена на златото, BGN/g;

σ_{AEL} – стандартно отклонение на избегнатите икономически загуби, BGN;

P_{OL} – процент на загубите при добив, %.

За изчисляването на средните избегнати загуби от проследяване на рудната зона се използва компютърен код, създаден за целите на изследването, написан на програмния език C++. Програмата има за цел да изчислява общата площ заключена между полигони с произволни форми. Разликата между площта на рудния полигон и общата площ на полигона преди и след отместването представляват площите на реализираното обедняване и загуби в случай, че се пренебрегне ефекта на отместването (фиг. 2.13). За създаването на програмата е развит съществуващ код за некомерсиални цели, създаден от A. Johnson, версия 6.4.2 (<http://www.angusj.com>), следващ алгоритмите на B. Vatti (1992) и M. Agoston (2005).

Средният процент от избегнатите загуби по руда обозначава очакваните загуби по руда за всеки руден полигон, coefficientът на вариация на загубите по руда се използва за идентифициране на рудните полигони, склонни към по-голямо разсейване на получаваните резултати и оценка на риска от при отклонение на реализираната стойност спрямо прогнозната средна величина. Икономическият аспект на проблема се измерва с показателя $\overline{AEL}$. Сложността на формата за всяка руда зони се измерва косвено и чрез трите показателя. Тъй като по-голяма стойност за всеки от показателите означава, че рудният полигон е по-приоритетен за проследяване, то за да се отчетат и трите като равнозначни, те се стандартизират по най-голямата стойност за съвкупността от рудните полигони:

$$\bar{P}_{AOL-st_i} = \frac{\bar{P}_{AOL_i}}{\bar{P}_{AOL_{max}}} \quad (2.56)$$

$$K_{var-AEL-st_i} = \frac{K_{var-AEL_i}}{K_{var-AEL_{max}}} \quad (2.57)$$

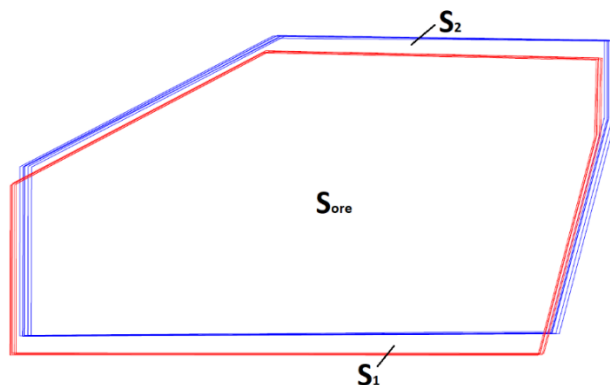
$$\overline{AEL}_{st_i} = \frac{\overline{AEL}_i}{\overline{AEL}_{max}} \quad (2.58)$$

$$R_i = \sqrt{\bar{P}_{AOL-st_i}^2 + K_{var-AEL-st_i}^2 + \overline{AEL}_{st_i}^2} \quad (2.59)$$

Аналогично на статичния подход, стандартизираните стойности са представени в координатна система, а ранжирането на всички рудни полигони от взривяваното поле е извършено по разстоянието R_i , прието за ранговата оценка.

Комплексен подход за трето приближение

Този подход разчита на модел за машинно обучение, използван за прогнозиране дължината на вектора на хоризонтално отместване за определени ключови места, където може да се постави ВММ. Подходът се основава на създаването на векторното поле на отместването за материална точка от взривяваното поле. За целта посредством интерполационните методи, известни в геостатистиката се генерират изкуствени вектори в определени точки от полето с цел установяване на потенциалното място на рудните полигони след взривяване. Резултатът от използването на векторите, чиято хоризонтална компонента се прогнозира от модел, базирани на машинно обучение, е дефиниран като еталонен модел. На базата на известните векторни дължини в определени точки от масива, е приложен на метода на Shepard (IWD) за определяне на местоположението на рудните зони след взривяване по аналогия с изследването на D. Taylor и I. Firth, (2003). По този начин е разгледан примера, за който при използването на краен брой ВММ датчици се получава груба и неточна представа за векторното поле и местоположението на рудата след взривяване. Отместените рудни полигони бяха сравнени с тези от базовия модел, използвайки развития алгоритъм на A. Johnson. Принципно схема на извършваните проверки между възможните форми на полигона, получени от интерполацията на векторното отместване по даден брой вложени датчици и интерполация на векторното отместване за базовия модел е представена на фиг. 2.14.



Фиг. 2.14. Принципно схема на сравнения между възможните положения на даден руден полигон за конкретен случай на поставяне на ВММ датчиците (червено) и възможните положения на същия руден полигон в базовия модел (синьо)

Част от интерполираните площи на отместените рудни зони са с незначително по-голяма или по-малка площ от първоначалната, което означава, че съществува даден процент на грешка при изчисляване на масите по руда ако се приемат допусканията на S. Zhang (1994). При използването на този подход за решаването на примерната задача като нейно двумерно приближение е прието, че важи зависимостта $H'/H \neq \rho/\rho' = K_p$, тъй като за всяка итерация на изчисляване на формата на рудните полигони не е валидно равенството $S_1=S_2$. Тази зависимост се доближава повече до действителните условия, при които с цел запазването на масовия баланс на минната маса е възприето за получената

граница от базовия модел да се приеме, че се запазва масата с тази на първоначалната форма на рудната зона. Следователно масата за границата, определена по метода на Shepard не се запазва, тъй като се счита за неправилно определена. В този случай се въвежда поправъчен коефициент Δ , приравняващ масата на рудата за дадена зона в масива към масата на рудата в съответната граница след отместване. Равенството на масовия баланс в този случай се изразява по следния начин:

$$H \cdot \rho \cdot \alpha \cdot \Delta \cdot [S_2 + S_{ore}] = H \cdot \rho \cdot \alpha \cdot S \quad (2.60)$$

За изследваните условия при минимална физическа разлика между двете зони може да се приеме, че е валидно, че коефициентът на разбухва (респективно насипната плътност) за материала, както и височината на взривения куп е сходна за зоните S_{ore} , S_1 и S_2 .

Изчисляването на загубите (P_{OL}) и обедняването (P_{OD}), произтичащи от добива по червената граница в сравнение с еталонната синя граница за всеки полигон за всяка итерация се изчисляват по формулите:

$$P_{OD} = \frac{\Delta \cdot S_1}{S} \quad (2.62)$$

$$P_{OL} = \frac{\Delta \cdot S_2}{S} \quad (2.63)$$

Изчисляването на икономическите последици от наличието на загуби и обедняване при приемането на червената граница (границата получена от метода на Shepard), равенството приема своята стандартна форма:

$$E = \frac{1 - P_{OL}}{1 - P_{OD}} [0,01 \cdot \alpha (1 - P_{OD}) \cdot \varepsilon \cdot P_m - C_f] \quad (2.64)$$

На тяхна база са изчислени финансовите потоци, произтичащи добива на даден руден полигон и по двата подхода:

$$OP = E \cdot (S_1 + S_{ore}) \cdot H \cdot \rho \quad (2.65)$$

За изчисляване на приоритета за проследяване на всеки полигон за N итерации са използвани показателите – средни очаквани финансови потоци ($\overline{OP}$) и коефициент на вариация на очакваните финансови потоци (K_{var-OP}):

$$\overline{OP} = \frac{\sum_i^N OP_i}{N} \quad (2.66)$$

$$K_{var-OP} = \frac{\sigma_{OP}}{\overline{OP}} \quad (2.67)$$

II.4. Организация на изследването

За периода на изследването бе проведен пасивен експеримент в открит рудник, добиващ златосъдържаща руда. При експеримента производственият процес е протичал без намесата на изследователя с цел получаването на възможно най-близка до производствените условия информация. Ролята на изследователя в този случай бе да се извърши констатация за въздействащите фактори върху резултатите, получени от взривните работи, да се оцени ефективността на прилаганите модели за определяне местоположението на рудните зони след взривяване и да се подобри ефективността от тяхното ползване без да се променя организацията на труда.

През първия етап (юли 2019 г. до октомври 2019 г.) бяха проучени основните литературни източници по тематиката на проблема. Теоретично бяха идентифицирани основните фактори, влияещи върху отместването на скалната маса при взривни работи. За периода бе направен вариационен анализ

на част от векторните данни от взривното отместване с цел установяване на общите закономерности при различни условия. Поради малкия брой на анализирани данни, се стигна до заключението, че бе необходимо осигуряването на достатъчен брой наблюдения за по-пълното анализиране на влиянието на взривното отместване върху обедняването и загубите.

През втория етап (от октомври 2019 г. до юли 2021 г.) бяха извършени над 200 бр. взривявания, на базата на които бяха получени общо над 1100 наблюдения за естеството на взривното отместване при различни инженерно-геоложки условия. Емпиричните данни бяха получени без да бъде оказвана намеса върху начина, по който се извършват работните процеси. Наблюденията бяха продължени с цел получаването на по-цялостен поглед върху естеството на изследвания проблем. За периода допълнително бяха проучени литературните източници по изследвания проблем. Паралелно бе разработен прототип на двумерен модел, имитиращ отместването на рудните зони при взривни работи.

През третия етап (от август 2021 г. до февруари 2022 г.) се извърши обработка на получените емпирични данни от първия и втория етап на експеримента. Установиха се важни за изследването закономерности, които подпомогнаха идентифицирането на допълнителни основни фактори за създаването на имитационен модел. За периода бе създаден прототипен модел, базиран на машинно обучение, за прогнозиране на дължината на вектора на хоризонтално отместване. Усъвършенстван е първоначалният прототипен модел, имитиращ двумерното отместване на рудните зони. За неговото точно функциониране се използва именно прогнозната оценка на дължината на вектора, получена от модела, базиран на машинно обучение. През третия период се изчисли и потенциалният икономически ефект от неговото приложение в промишлените условия на рудника. Въз основа на етапа на разработване на находището изведени са ограниченията и пригодността на приложение на трите подхода. Освен това бе извършено сравнение на точността на отделните методи за прогнозиране на дължината на хоризонталния вектор във векторното поле на отместването.

Обработката на информацията и извършването на изчислителните работи по изследването се извършиха извърши посредством специализирани софтуерни продукти, описан на табл. 2.5.

Таблица 2.5. Използвани софтуерни продукти в текущото изследване

Име на софтуерния продукт	Цел на използването
O-Pitblast	Дигитализиране на схемите на свързване от паспортите на ПВР и получаване на изохроните в зависимост от приложената схема на свързване
Autodesk Civil 3D	Измерване на ориентацията на изохроните за изследваните взривявания и обогатяване на информационната база със стойностите на част от въведените локални показатели за ВММ датчиците
BMM Explorer	Генериране на таблични данни, свързани с реално заснетите отмествания на ВММ датчиците
IBM SPSS Statistics	Статистическа обработка на емпиричните данни
IBM SPSS Modeler	Създаване и валидиране на моделите за машинно самообучение
Microsoft Excel	Графично представяне на резултатите от статистическата обработка
XLStat (Microsoft Excel Add-in)	Проверка на емпиричните разпределения на изследваните векторни данни
XLRisk (Microsoft Excel Add-in)	Генериране на случайни числа по копула на Clayton и копула на Frank при предварително определени разпределения и корелационни коефициенти
ArcMap	Създаване на модел на отместванията в пространството, базиран на видовете Кригинг и метод на Shepard
Microsoft Visual C++	Създаване на прототипен модел за имитиране на различните сценарии на отместванията в двумерна среда на базата на съществуващ код за некомерсиални цели

В резултат на приложените методи са получени следните резултати:

1. Определени са основните фактори, които влияят на взривното отместване (дълбочината на поставяне на ВММ датчика, вида на взривното вещество, схемата на свързване на сондажите, параметрите на ПВР, наличието на буфер пред откритата повърхност, вида на скалните разновидности);
2. Определено е влиянието на хоризонталните векторните компоненти върху процентите на реализираните загуби и обедняване;
3. Създадени са регресионни модели за прогнозиране на дължината на хоризонталната компонента на взривното отместване. В резултат на това са получени прогнозните местоположения на рудните полигони във взривения куп;
4. Определени са приоритетните за проследяване рудни зони за дадено взривно поле. Най-приоритетни са тези, върху които най-силно влияят обедняването и загубите вследствие на взривното отместване;
5. Определен е икономическият ефект от прилагането на методиката. Освен това е оценен очаквания икономически ефект от прилагането на нов еталонен модел за определяне на местоположенията на рудните зони след взривяване.

ГЛАВА 3. РЕЗУЛТАТИ ОТ ДИСЕРТАЦИОННОТО ИЗСЛЕДВАНЕ

Получените резултати са обработени и анализирани чрез комплекс от математико-статистически методи. Разкрити са зависимости важни за науката и практиката в областта на минно-добивната промишленост и по-конкретно взривното отместване и локализирането на рудните зони във взривения куп посредством числено моделиране.

III.1. Общи закономерности на отместването при взривяване

От приложените математико-статистически методи се установи, че най-съществено значение за взривното отместване имат видът на използваното ВВ, дълбочината на поставяне на ВММ датчика и видът на скалните разновидности. Показателите, свързани със сезонните особености и наличието на буфер пред откритата повърхност са пренебрегнати за нуждите на моделирането в настоящото изследване като фактори, които не оказват съществено въздействие върху резултата от взривното отместване. Като обща закономерност се наблюдава, че независимо, че при различните видове ВВ, скални разновидности и дълбочини на поставяне на ВММ датчиците, разликите в медианите на отделните сравнявани съвкупности е в порядъка до 40 см за хоризонталната компонента на отместването, което е сравнимо с размера на получаваните скални късове при взривни работи (при среден размер 0,25 m). от практическа гледна точка подобна разлика е малка и се дължи именно на намаления относителен разход на ВВ, слабите физикомеханични свойства на масива и ниската височина на добивните стъпала в сравнение с други рудници, прилагащи технологията на ВМТ за проследяване на взривното отместване.

Основно значение има наличието на корелационни зависимости между векторните компоненти на отместването както за всяко от двете подстъпала поотделно, така и между самите тях. За целта е използван корелационният коефициент на Spearman. На табл. 3.8 е представена корелационна матрица на взаимовръзките между тях.

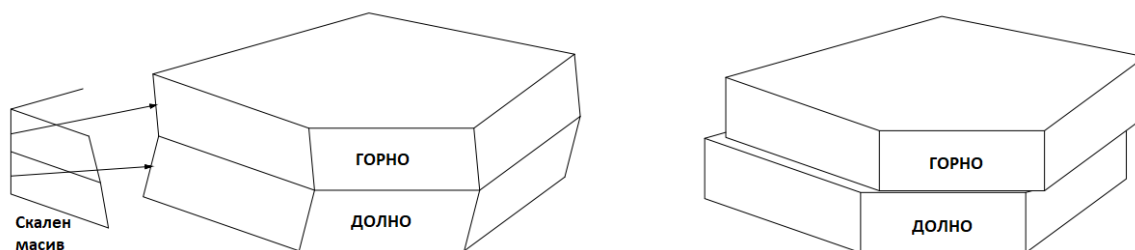
Таблица 3.8. Корелационна матрица на взаимовръзките между векторните компоненти за горно и долно подстъпало

		горно подстъпало							долно подстъпало						
горно подстъпало	*	M _{3D}	M _H	M _{H-ff}	M _{H-dev}	α _H	M _V	α _V	M _{3D}	M _H	M _{H-ff}	M _{H-dev}	α _H	M _V	α _V
	M _{3D}	1.00	,973**	,967**	-0.02	0.07	,541**	-,350**	,783**	,772**	,773**	-0.07	0.00	,277**	0.01
	M _H	,973**	1.00	,989**	-0.02	0.07	,383**	-,512**	,790**	,794**	,791**	-0.07	0.00	,193**	-0.08
	M _{H-ff}	,967**	,989**	1.00	-0.02	0.07	,393**	-,491**	,780**	,782**	,792**	-0.07	0.00	,201**	-0.07
	M _{H-dev}	-0.02	-0.02	-0.02	1.00	,927**	-0.08	-0.04	0.00	0.01	-0.01	,637**	,575**	-0.01	0.01
	α _H	0.07	0.07	0.07	,927**	1.00	-0.02	-,100*	0.07	0.08	0.07	,588**	,593**	0.01	0.01
	M _V	,541**	,383**	,393**	-0.08	-0.02	1.00	,483**	,349**	,307**	,322**	-,118**	-0.08	,543**	,399**
	α _V	-,350**	-,512**	-,491**	-0.04	-,100*	,483**	1.00	-,390**	-,429**	-,404**	-0.04	-,090*	,293**	,440**
долно подстъпало	M _{3D}	,783**	,790**	,780**	0.00	0.07	,349**	-,390**	1.00	,984**	,962**	-0.08	0.01	,231**	-,105**
	M _H	,772**	,794**	,782**	0.01	0.08	,307**	-,429**	,984**	1.00	,975**	-,085**	0.00	,170**	-,165**
	M _{H-ff}	,773**	,791**	,792**	-0.01	0.07	,322**	-,404**	,962**	,975**	1.00	-,094**	-0.01	,198**	-,128**
	M _{H-dev}	-0.07	-0.07	-0.07	,637**	,588**	-,118**	-0.04	-0.08	-,085**	-,094**	1.00	,904**	-0.05	0.00
	α _H	0.00	0.00	0.00	,575**	,593**	-0.08	-,090*	0.01	0.00	-0.01	,904**	1.00	-0.04	-0.01
	M _V	,277**	,193**	,201**	-0.01	0.01	,543**	,293**	,231**	,170**	,198**	-0.05	-0.04	1.00	,870**
	α _V	0.01	-0.08	-0.07	0.01	0.01	,399**	,440**	-,105**	-,165**	-,128**	0.00	-0.01	,870**	1.00

От корелационната матрица се вижда, че дължината на хоризонталния вектор на отместването (респективно тримерния вектор на отместването) за горното подстъпало се влияе значително от тази на долното подстъпало ($R=0,794$). Това налага при разглеждането на проблема за взривното отместване, макар и като двумерна задача, да бъде отчетена взаимовръзката между двете подстъпала. Друга съществена зависимост, която се разкрива от изчислените корелации е, че съществува силна взаимовръзка между алгебричната мярка на вектора, отклоняващ движението в хоризонтално направление (M_{H-dev}) между двете подстъпала ($R=0,637$). Аналогична, но по-слаба е зависимостта и между посоките на хоризонталното отместване за двете подстъпала ($R=0,593$). Съществува и умерена взаимовръзка между дължината на вектора на вертикално отместване за горното и долното подстъпало ($R=0,543$). Освен изброените, съществуват още и други по-слаби взаимовръзки между дължината на хоризонталното отместване за долното подстъпало и вертикалното отместване за горното ($R=0,307$). От

гледна точка на физическото естество на процеса, разрушението на скалата на горното подстъпало е по-малко в сравнение с това на долното подстъпало води до различните им коефициенти на разбухване. Ниската корелация между двете вертикални компоненти свидетелства и за слабата корелация между двата коефициента на разбухване. Останалите по-ниски стойности на корелациите в разгледаната матрица свидетелстват за това, че двойките показатели могат да се приемат като линейно независими.

Като обобщение може да се посочи че взривната динамика за двете подстъпала води до голямо разсейване на резултатите за компонентите на тримерния вектор на отместването. Въпреки това съществуват ясни разлики в естеството на резултатите за двата основни компонента – хоризонталния и вертикалния компонент. Съществуващата разлика между тях е статистически достоверна, като размерът ѝ може да се приеме, че е близък до размера на средния скален къс при взривяване (около 0,25 m). Освен изброените разлики, съществуват още и зависимости между векторните компоненти за двете стъпала, които не могат да бъдат пренебрегнати за целите на моделирането. Друг основен извод, който може да се направи от това сравнение е, че в откритите рудници с относително ниски стъпала (при $H=5m$), използващи нисък относителен разход на BB, не може да се наблюдава ясно D-образната крива на отместването при взрива. Това се дължи на наличието на по-голямо отместване на нивото на забивката и над средата на стъпалото. Поради това при моделирането на местоположението на рудата във взривения куп може да се пренебрегне D-образният ефект на взривното отместване за по-голяма простота на модела (фиг. 3.4)



Фиг. 3.4. Извършено опростяване на формата на произволна рудна зона след отместването за целите на апроксимиращите подходи

III.2. Зависимости между взривното отместване и комплекса от разглежданите фактори

III.2.1. Резултати от приложения корелационен анализ

За този анализ бе използван коефициентът на корелация на Spearman, тъй като разпределението на променливите не е нормално. Общата дисперсия на данните, както и фактът, че извадката е небалансирана, водят до получаването на по-ниски коефициенти на корелация. Въпреки това може да се забележи, че параметрите на конструкцията на взрива са ключови за размера на движението, както е показано на табл. 3.20.

От корелационната матрица може да се заключи, че отместването се влияе от проектните параметри на взривните работи и най-вече от количеството газови продукти (LGP), които всеки от двата типа взривно вещество освобождава след детонация. Ключова се оказва ролята на разстоянието между сондажните редове (LB), което може да се приеме, че има пряка връзка с линията на най-малко съпротивление, която възниква при на новообразувана открита повърхност пред мястото на сондажа, в който се намират BMM датчиците. На база по-високите корелационни коефициенти, действието на вида BB се отчита по-добре с показателя LGP в сравнение с показателя локалния относителен разход на BB (LPF). Това се обяснява с бутащото действие на разширяващите се взривни газове в ограниченото пространство на сондажа през третия стадий на разрушаване на скалите.

Таблица 3.20. Корелационна матрица на изследваните взаимовръзки

	M3D	MH	MH-ff	MH-dev	α_H	MV	α_V	He
LB	-,294**	-,279**	-,295**	0.078	0.052	-,222**	-0.093	-,338**
LS	-0.103	-0.105	-0.091	-0.102	-0.078	-0.098	-0.026	-,270**
LJ	,301**	,313**	,331**	0.054	0.060	0.150	-0.036	,317**
LT	-,330**	-,331**	-,325**	-0.032	-0.069	-,187*	0.017	-,333**
LH	0.102	0.105	0.130	-0.031	-0.004	0.014	-0.050	-0.073
LKJ	,278**	,271**	,294**	-0.065	-0.046	,213**	0.081	,365**
LKT	0.108	0.093	0.107	-0.075	-0.066	0.134	0.112	,178*
LKH	,355**	,335**	,382**	-0.056	-0.019	,283**	0.114	,332**
LKS	,202*	,188*	,220**	-0.147	-0.086	0.144	0.073	0.089
Dff	-0.059	-0.050	-0.034	,170*	,184*	-0.047	-0.013	-,204*
Dbf	0.151	,160*	0.136	-0.022	-0.034	0.063	-0.032	,201*
Dfl-f	-,169*	-,178*	-,181*	-,176*	-,192*	-0.061	0.008	-0.122
Dfl-b	,201*	,209*	,193*	0.137	,196*	0.055	-0.013	,240**
Kff	-0.125	-0.125	-0.104	0.104	0.115	-0.059	0.016	-,231**
Kfl	-,217**	-,226**	-,216**	-,163*	-,208*	-0.071	0.010	-,231**
LPF	,268**	,266**	,307**	-0.064	-0.090	,168*	0.009	,221**
LGP	,415**	,408**	,454**	-0.052	-0.059	,232**	0.024	,364**
ID	-,302**	-,244**	-,280**	0.057	0.078	-,559**	-,433**	-0.046

Като цяло се наблюдават ниски корелационни коефициенти, което потвърждава, че разглежданото явление е силно разсеяно. Получените ниски корелации от една страна могат да се дължат на факта, че поради естеството на взривните работи действителните неизвестни стойности на взривния ефект трудно могат да бъдат отчетени. Във взривното дело съществуват и други фактори, от които зависи реализирания резултат, като преди всичко е необходимо да се спомене, че не е известен общият химически коефициент на полезно действие, както и процентът на енергията, която отива за механична работа (Митков, 2020). Независимо от това, корелационният анализ отново потвърждава ролята на вида на използваното ВВ. Дълбочината на поставяне на датчика (ID) също влияе на движението, като тя има основно значение върху вертикалното отместване, както бе установено и от сравнителния анализ. Следователно потвърждава се изводът, че в двете подстъпала на базата на различно вертикално отместване се очаква да съществува различен коефициент на разбухване на материала във взривения куп.

Друга причина, на която се дължат ниските корелационни коефициенти, е поради факта, че значителна част от наблюденията са извършвани при намален относителен разход на ВВ. За бъдещо изследване на проблема се препоръчва преминаването към т. нар. балансиран експеримент, при който е необходимо да се приложат различни методи за получаването на подизвадка чрез осигуряване на равен брой наблюдения за разглеждан комплекс от условия. По този начин, при условие, че изследването се продължи и се получат по-голям брой наблюдения при различни условия, би могло да се премине към по-специализираното изучаване на въздействието на отделните фактори върху параметрите на отместването и респективно се очаква получаването на по-високи нива на корелация.

III.2.2. Резултати от създадените регресионни модели

Към представителната извадка са включени допълнителни 30 наблюдения за взривното отместване, което се наблюдава в „Зона 2“, с цел създаването на първоначален прогностичен модел. Това е осъществено, за да се направи предварителна оценка на възможността за бъдещото създаване и прилагане на подобен комплексен модел в промишлени условия. При всички анализи важи условието, че е използвано разделяне на извадки 70/30 за първоначална оценка на точността на модела, след което е направена 5-степенна крос валидация (5-fold cross validation) за установяване на прогнозиращата способност на създадените модели при бъдещото им използване при непознати данни.

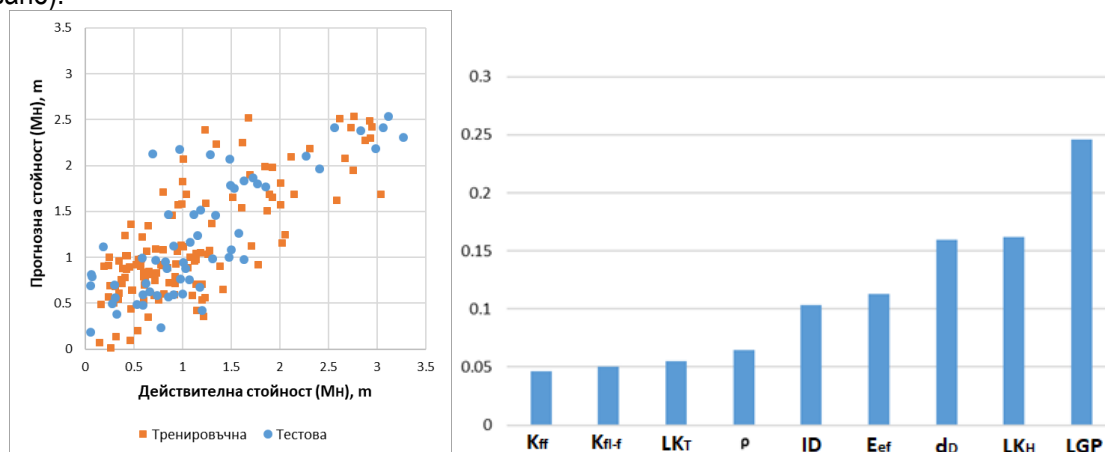
Модел, базиран на множествена линейна регресия (MLR)

За създаването на модел на множествена линейна регресия бяха използвани единствено непрекъснатите променливи – ID , LK_H , LGP , LK_T , K_{ff} , K_{bf} . Поради невъзможността да бъдат отчетени номиналните показатели, обозначаващи спецификата от условията на средата, е възприето използването на обемната плътност на всеки от типовете скали (ρ [t/m^3]), ефективна детонационна енергия за съответното ВВ (E_{ef} [KJ]) и диаметър на използвания бустер (d_D [mm]) и минимална скорост на детонацията на използвания бустер (V_D [m/s]). Всяка от стойностите на променливите е нормализирана в интервала $[0, 1]$. На базата на изследваните наблюдения бяха изведени следните резултати (табл. 3.21):

Таблица 3.21. Резултати от приложението на множествена регресия (MLR)

Показател	Тренировъчна група	Тестова група
R^2	0.5868	0.6286
MAE	0.4158	0.3760
RMSE	0.5227	0.6132

На фиг. 3.11 е представена зависимостта между прогнозните данни според модела и съответстващите им действителни стойности. Вдясно са степенувани по значимост използваните променливи за формирането на целевата променлива (дължината на хоризонталния вектор на отместване).



Фиг. 3.11. Зависимост между прогнозните величини за хоризонталния вектор според модела (MLR) и техните действителни стойности (ляво) и според използваните променливи (дясно)

От изведените зависимости може да се заключи, че най-голямо значение за взривното отместване има освобождаваният обем на взривните газове, освободени при детонация. Значение според модела имат още вида на междинния детонатор за инициране на ВВ, и ефективната енергия при детонация на използваното ВВ. Това следва логиката, че по-голямата детонационна енергия позволява образуването на повече пукнатини в масива, което позволява по-лесното разрушаване на скалните и късове и по-лесното преминаване на взривните газове. Не по-маловажен фактор се оказва и отношението между височината на стъпалото в определени участъци и разстоянието между взривните редове в тях. Тази зависимост може да се обясни на базата на теоретичния анализ, направен в настоящия труд. Разстоянието между взривните редове при диагоналната схема на свързване се явява показател, който силно корелира с дължината на ЛНС, която се получава за всяка новообразувана открита повърхност в процеса на взривяване на полето. Височината на стъпалото в отделните участъци на взривяването поле корелира с дължината на пътя, който изминава взривяваната скала.

За валидирането на модела е приложена 5-степенна крос валидация, като след прилагането ѝ се установи, че моделът притежава коефициент на детерминация $R^2=0,6068$ за тренировъчната група, а за тестовата група $R^2=0,57$. За създадения модел могат да се направят изводите, че въпреки наличието на емпирична формула, нейното практическо приложение за прогнозиране и моделиране не е

препоръчително заради високия процент на грешка. Тъй като реализираната точност не отговаря на практическите изисквания на производствения процес (размерът на абсолютната грешка е по-голям от средния размер на скалния къс), необходимо е търсенето на други подходи за подобряване точността на прогнозата.

Модел, базиран на многослоен перцептрон (ANN-MLP)

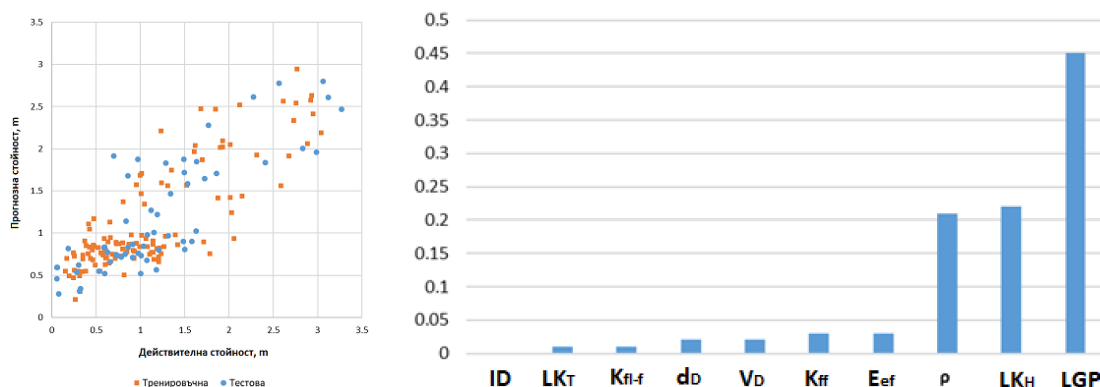
При създаването на модела е спазена същата пропорция на разделение на извадката (70/30). Използваните прогнозни променливи за модела включват ID , ρ , E_{ef} , d_D , V_D , LGP , LK_H , LK_T , K_{ff} и K_{ff-f} , като предварително те са нормализирани в интервала $[0, 1]$. Изведени са следните резултати при тренировъчната и тестовата група (табл. 3.22).

Таблица 3.22. Резултати от приложението на многослоен перцептрон (ANN-MLP)

Показател	Тренировъчна група	Тестова група
R^2	0.7090	0.6889
MAE	0.3527	0.3402
RMSE	0.4401	0.5833

Архитектурата на невронната мрежа, за която е създаден моделът, е при входящ слой с 10 променливи, 1 скрит слой с 2 перцептрона и 1 изходен слой (10-2-1). Въпреки невъзможността за приложение на модела в промишлени условия ($MAE > 0,25$ m), на този етап се потвърждава, че най-голямо значение за хоризонталното отместване има обемът на газовите продукти, които се освобождават при детонация. Височината на стъпалото и разстоянието между редовете за сондажната мрежа също се оказват ключови при формиране на зависимостите на взривното отместване в разгледания модел. След използването на подхода за 5-степенна крос валидация получените резултати за тренировъчната извадка са $R^2 = 0,7448$ и за тестовата извадка – $R^2 = 0,5914$.

На фиг. 3.13 е представена зависимостта между прогнозните данни според модела и съответстващите им действителни стойности. Вдясно са степенувани по значимост използваните променливи за формирането на целевата променлива (дължината на хоризонталния вектор на отместване).



Фиг. 3.13. Зависимост между прогнозните величини за хоризонталния вектор според модела (ANN-MLP) и техните действителни стойности (ляво) и според използваните променливи (дясно)

Поради наличието на малък брой наблюдения комплексността на модела се оказва, че не довежда до значително подобряване на прогнозната точност спрямо получения от модела на множествена регресия (MLR).

Поради тази причина е необходимо увеличаване на броя наблюдения за по-обоснованото използване на ANN-MLP при напредване на минните работи.

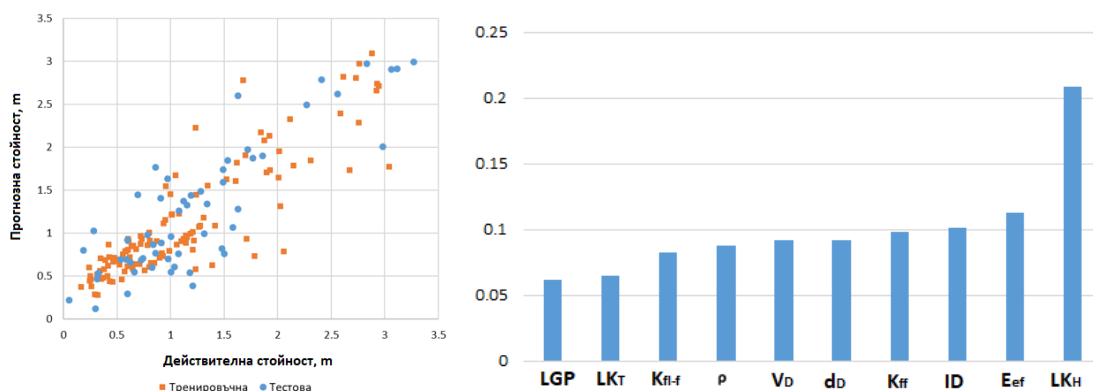
Модел, базиран на регресия на опорните вектори (SVR)

За разлика от изкуствената невронна мрежа, в редица случаи използването на машина на опорните вектори може да се окаже по-целесъобразно, особено при наличието на сравнително малки извадки. При създаването на модела е спазена същата пропорция на разделение на извадката (70/30). Използваните прогнозни променливи за модела включват ID , ρ , E_{ef} , d_D , V_D , LGP , LK_H , LK_T , K_{ff} и K_{bf} , като предварително те са нормализирани в интервала $[0, 1]$. Изведени са следните резултати при тренировъчната и тестовата група (табл. 3.23).

Таблица 3.23. Резултати от приложението на регресия на опорните вектори (SVR)

Показател	Тренировъчна група	Тестова група
R^2	0.7797	0.7674
MAE	0.2785	0.3093
RMSE	0.3827	0.5562

На фиг. 3.15 е представена зависимостта между прогнозните данни според модела и съответстващите им действителни стойности. Вдясно са степенувани по значимост използваните променливи за формирането на целевата променлива (дължината на хоризонталния вектор на отместване).



Фиг. 3.15. Точност на регресионния модел - SVR (ляво) и значимост на използваните показатели (дясно)

Моделът е валидиран при 5-степенна крос валидация, като получените резултати за тренировъчната група са – $R^2=0,7448$, а за тестовата група $R^2=0,6529$. Наблюдава се подобрене на прогностичните възможности на модела спрямо предишните, което представлява предпоставка за неговото бъдещо използване в промишлени условия при получаване на допълнителни емпирични данни.

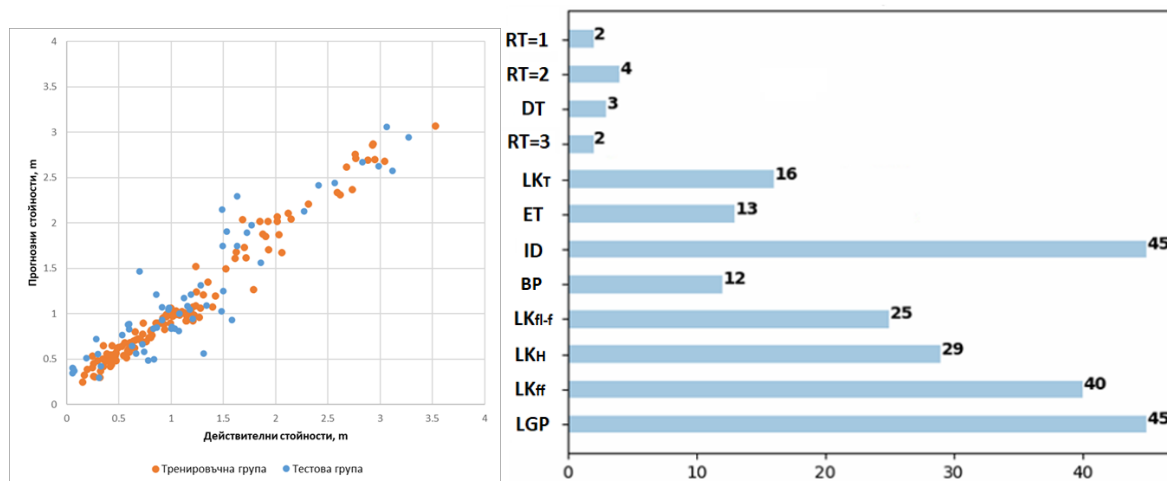
Модел, базиран на ансамбовия алгоритъм XGBoost за развиване на регресионни дървета

За разлика от останалите описани модели, регресионните дървета се оказват по-гъвкави за разгледания проблем. Освен непрекъснатите променливи, включени са още и номинални променливи, като нормализирането на всички използвани променливи не е задължително. В случая не е извършено нормализиране, за да се отчете непосредственото значение на физическата величина. Използваните прогнозни променливи за модела включват ID , ET , RT , DT , LK_H , LK_T , K_{ff} и K_{bf} . Изведени са следните резултати при тренировъчната и тестовата група (табл. 3.24).

Таблица 3.24. Резултати от приложението на множествена регресия (XGBoost)

Показател	Тренировъчна група	Тестова група
R^2	0,9692	0,8532
MAE	0,1186	0,2384
RMSE	0,1659	0,3044

На фиг. 3.17 е представена зависимостта между прогнозните данни според модела и съответстващите им действителни стойности. Вдясно са степенувани по значимост използваните променливи за формирането на целевата променлива – дължината на хоризонталния вектор на отместване (M_H). Освен изведените зависимости за ролята на газовите продукти при детонацията, вида на използваното ВВ, разстоянието между взривните редове и височината на стъпалото, създаденият прогностичен модел установява, че от най-съществено значение е още и дълбочината на поставянето на датчика. Това отново може да се обясни с пътя, който е необходимо да измине даден скален къс, разположен на определено ниво от височината на стъпалото. Друг ключов фактор, който е идентифициран от модела, е разстоянието на датчика до откритата повърхност. Макар да не съществува линейна връзка между отместването и местоположението на ВММ датчика, се оказва, че то намалява при неговото отдалечаване от откритата повърхност.

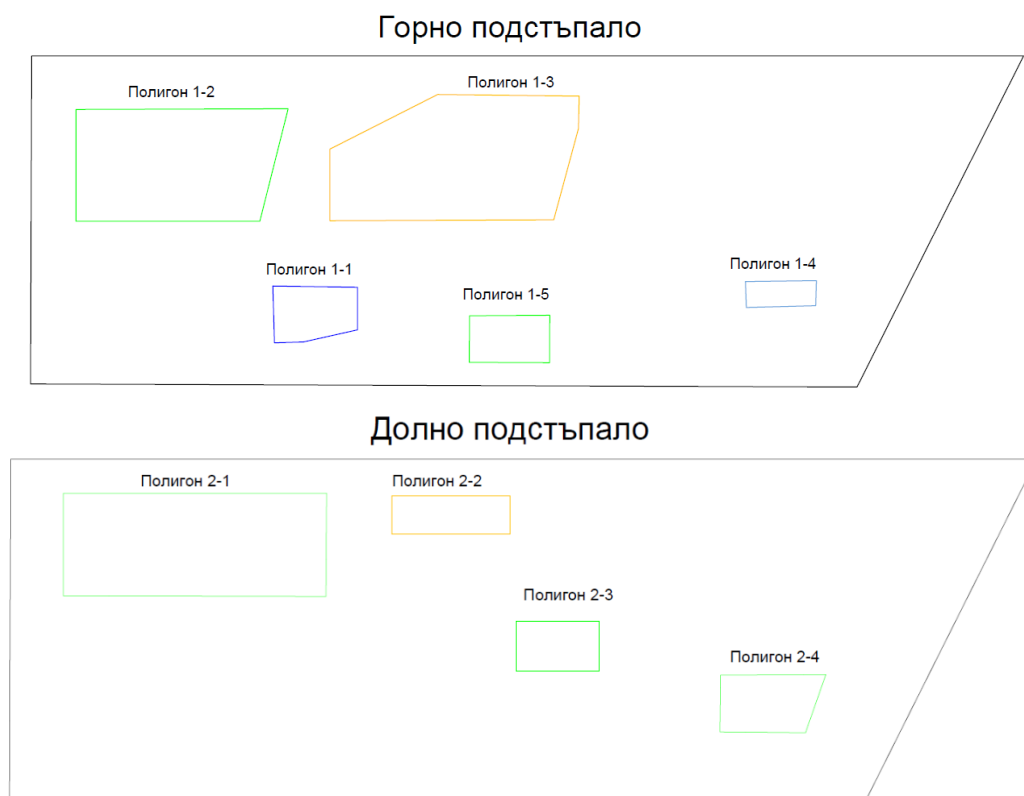


Фиг. 3.17. Точност на регресионния модел – XGBoost (ляво) и значимост на използваните показатели (дясно)

Моделът е валидиран при 5-степенна крос валидация, като получените резултати за тренировъчната група са: $R^2=0,9761$, а за тестовата група $R^2=0,7482$. Освен това се наблюдава известно „пренапасване“ за създадения модел спрямо тренировъчната, което задължително трябва да бъде избегнато при бъдещо решаване на аналогичен проблем. За нуждите на теоретичен анализ моделът може да послужи за илюстративни цели, но за производствени цели е необходимо извършването на достатъчно наблюдения и валидирането на модела с цел неговото регулярно използване в практиката на открития добив. Друг важен извод, който бе направен от изследването е, че за бъдещи изследвания по-оправдано е използването на методите за машинно обучение пред подходите, търсещи аналитична зависимост между прогнозираната величина и входните параметри.

III.3. Приоритетни за проследяване рудни зони и моделиране на взривното отместване

Приложението на гореописаната методика е направена върху взривно поле, което чиито условия са типични за разгледания набор от случаи през периода на изследването. Направена е оценка за това как може да се подобри настоящата използвана методика, както и да бъдат избегнати евентуални грешки. За даденото взривяване е използвана сондажна мрежа 3,2 x 3,7 m, нафтоселитрено взривно вещество и лят бустер за неговото инициране. Дължината на линията на най-малко съпротивление е 3,8 m, като типа на скали, в които е извършено взривяването са брекчо-конгломерати. Относителният разход на ВВ е 0,345 kg/m³. На фиг. 3.19 е представена обща схема за разположението на рудните полигони на горното и долното подстъпало.



Фиг. 3.19. Местоположение на рудните зони преди взривяването

Необходимо е да се уточни, че изображените полигони не са действителните, а служат за илюстративна цел за приложението на метода, тъй като действителните са обект на търговска тайна. Целта на този пример е да илюстрира как методиката може да се реализира практически в различните стадии на разработване на дадено находище. Освен това са посочени и предимствата, и получените резултати при прилагането на всеки от методите, както и ограниченията налагащи тяхното коректно приложение. Задължително условие за прилагането на метода посредством комплексното моделиране на отместването преди взривяването е то да се осъществява в експлоатационния период на разработване на дадено находище след напредването на минните работи в дълбочина и след натрупването на достатъчно голям брой наблюдения за създаването на модел, базиран на машинно обучение.

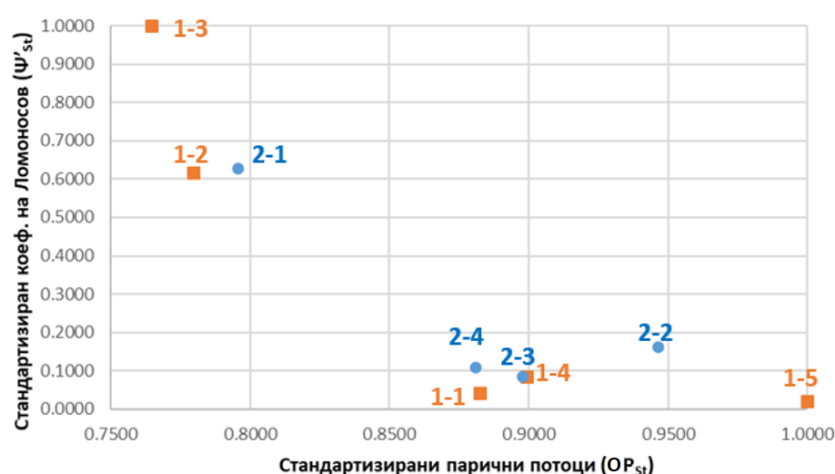
III.3.1. Резултати от прилагането на статичен подход за първа апроксимация

За получаването на първоначална оценка за това кои полигони са приоритетни за проследяване е използван статичен подход, при който не се отчита взривното отместване, а се изхожда единствено от сложността на формата на рудните полигони и потенциалните парични потоци, които биха могли да се генерират при техния добив. Сложността на тяхната форма е изразена посредством модифицирания коефициент на Ломоносов. На базата на предварително очертани рудни полигони от блоковия модел са намерени техните геометрични характеристики. Изчислено е и извлеканото количество на полезния компонент, съдържащо се във всеки руден блок, като за текуща цена на златото е прието да се използва 60 USD/g, за извличането е заложено 85%. С цел постигането на съпоставимост на резултатите между модифицирания коефициент на Ломоносов, те са стандартизирани. На табл. 3.25 е представена обобщена информация за рудните полигони на двете подстъпала за конкретното взривяване.

Таблица 3.25. Обобщена информация за рудните полигони

Подстъпало	Рудна зона	Съдържание на Au, (g/t)
ГОРНО	1-1	Бедно
	1-2	Средно
	1-3	Средно
	1-4	Богато
	1-5	Бедно
ДОЛНО	2-1	Средно
	2-2	Богато
	2-3	Средно
	2-4	Средно

Въз основа на получените резултати за изследваните полигони от двете подстъпала показателите Ψ'_{St} и OP_{St} се нанасят в двумерна координатна система (фиг. 3.20).



Фиг. 3.20. Приоритетни за проследяване на рудните зони – статичен подход

На базата на разстоянието между всяка точка в координатната система и нейното начало се ранжират отделните полигони, като най-нисък ранг получава този полигон с най-голямо разстояние от началото на координатната система.

От получените резултати може да се посочи, че ключови за проследяване се явяват полигони 1-3, 1-5 и 1-2 за горното подстъпало и 2-1, 2-2 и 2-3 за долното подстъпало. За тях е необходимо влагането поне по 1 ВММ датчик, който да осигури проследяването на тяхното отместване при взривяване. Като предимство на метода може да бъде посочено, че той е изключително бърз и лесен за изпълнение. При наличието на необходимата входна информация методът не изисква специализиран софтуер или мощна изчислителна техника. При липсата на статистическа информация за характера на отместването при взривни работи в различни условия този подход се оказва единственият валиден за даването на първоначална оценка на това кои зони се явяват най-приоритетни за проследяване. Основният недостатък на метода се свързва именно с неговата простота, което не позволява отчитането на взривната динамика и въздействието ѝ върху потенциалните проценти на загубите и обедняването, които биха възникнали при различни сондажни мрежи, различни схеми на свързване, както и при използването на различни видове ВВ.

III.3.2. Резултати от прилагането на динамичен подход за втора апроксимация

При втория предложен подход се прави оценка на избегнатите загуби при краен брой реализации на вектора на отместването за всеки полигон. За целта, на базата на натрупана статистическа информация за предходни взривни работи в аналогични условия за същото находище, може да бъде апроксимиран вида на статистическото разпределение на показателите на отместване. Като най-важна

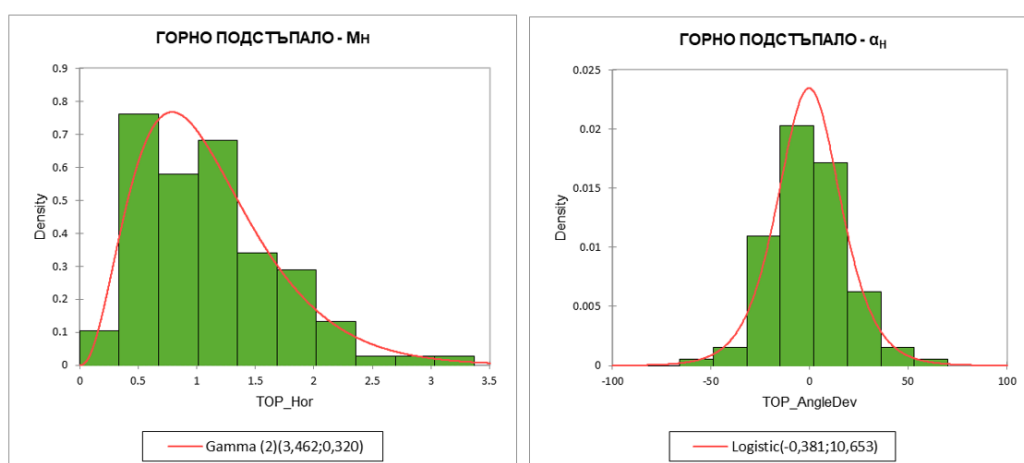
за формирането на хоризонталния вектор се търси най-подходяща апроксимация на вида на разпределението на дължините на двата съставни вектора – M_H и α_H . За целта е обособена извадка на взривяванията, извършвани единствено посредством нафтоселитрено ВВ със средството за взривяване, което се планира да се използва за конкретното взривяване – ЛБ 450 g. Броят на наблюденията в тази извадка са 113, като репрезентативната грешка за M_H и α_H за горното стъпало са респективно 0,11 m и 3°, а за долното – 0,14 m и 6°.

От получените резултати се забелязва, че разпределенията на извадките са с големи стойности на ексцеса, което означава, че за показателите е необходимо да се търси приближение на разпределение, различно от нормалното. На таблица 3.28 са представени вероятностите, получени от критерия на Kolmogorov-Smirnov при сравнението на разпределението, получено от емпирични данни, с еталонно при дадени стойности за неговите параметри.

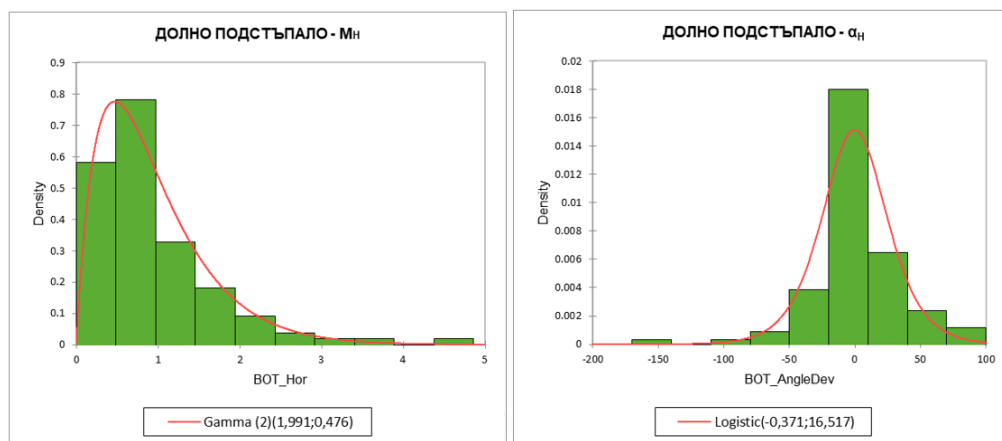
Табл. 3.28. Проверка на вида разпределение за изследваните променливи M_H и α_H при взривните работи с аналогични условия на изследвания случай

Вид на разпределението	Вероятност (p)			
	ГОРНО ПОДСТЪПАЛО		ДОЛНО ПОДСТЪПАЛО	
	M_H	α_H	M_H	α_H
Beta	0.724	0.892	-	0.030
Gamma	0.914	-	0.707	-
GEV	0.628	0.011	0.004	-
Log-normal	0.811	-	0.639	-
Logistic	0.675	0.992	0.071	0.239
Normal	0.221	0.906	0.007	0.038
Weibull	0.732	-	0.414	-

Въз основа на получените резултати може да се направи извода, че съществува възможност да бъде описан всеки от показателите на отместването с известна форма на разпределението. Следва да се отбележи, че колкото по-голяма е вероятността дадено разпределение да описва полученото по емпирични данни, то толкова по-точна ще бъде оценката, получена от приложението на метод 2 за оценка на стойностите на избегнатите загуби. За тази цел е необходимо получаването достатъчно голям брой наблюдения (най-малко 100) за съответния паспорт на ПВР. На фиг. 3.21 и 3.22 са представени хистограми на емпиричните данни и кривата на разпределението, което най-добре описва тяхната вариация.

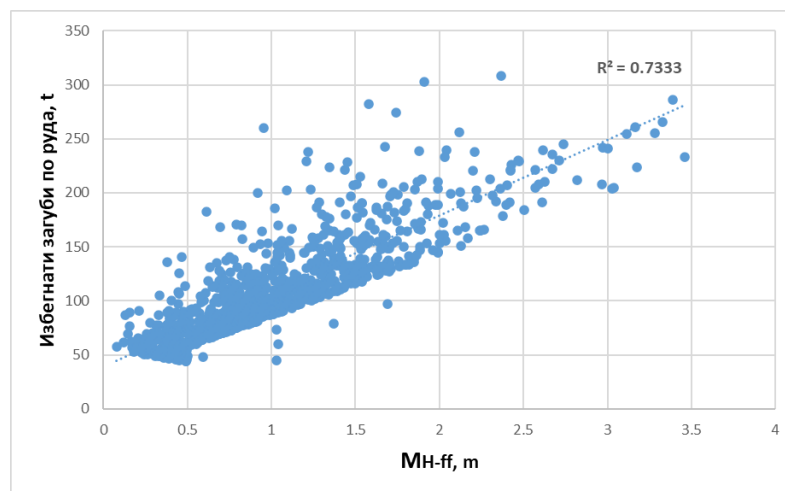


Фиг. 3.21. Установени емпирични разпределения, описващи най-добре променливите M_H и α_H за горно подстъпало



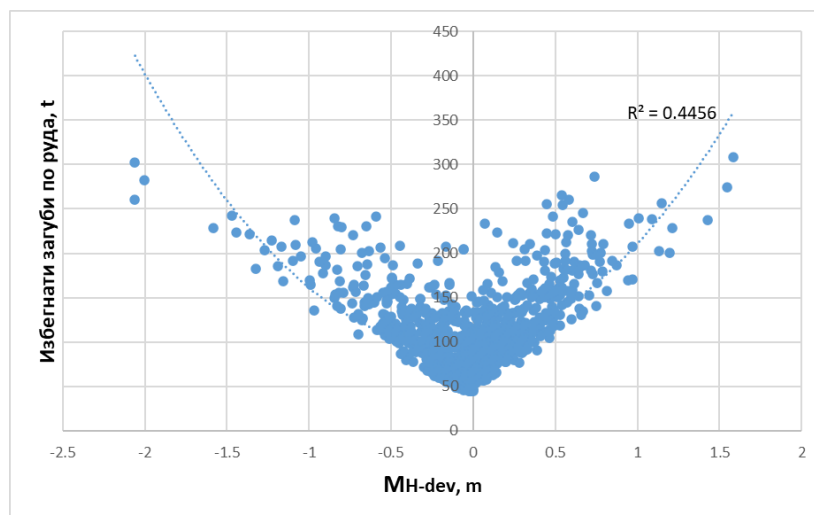
Фиг. 3.22. Установени емпирични разпределения, описващи най-добре променливите M_n и α_n за долно подстъпало

При едновременното генериране на разпределенията на M_n за горното и долното подстъпало е запазено нивото на корелация между тях. Аналогичен подход е възприет и за α_n , като в този случай е използвана копула на Frank, която е подходяща за относително симетрични разпределения. Прието е, че останалите двойки величини са линейно независими. Генерирани са 3 случая по 1000 реализации за всеки от четирите показателя с цел изчисляване на лицата за всеки един от случаите. Сравнени са получените величини на показателите: средни избегнати икономически загуби ($\overline{AEL}$), коефициента на вариация на избегнатите икономически загуби ($K_{var-AEL}$) и средния процент загуби за всяка рудна зона (P_{AOL}) с цел установяването на това дали те се изменят значително при определена реализация на вектора на отместването. На база имитационното моделиране се установи, че основният компонент на хоризонталното отместване най-силно въздейства върху реализираните стойности за избегнатите загуби руда, като зависимостта между тях е права (фиг. 3.26).



Фиг. 3.26. Установена зависимост между избегнатите загуби по руда и дължината на основния компонент на вектора на хоризонталното отместване

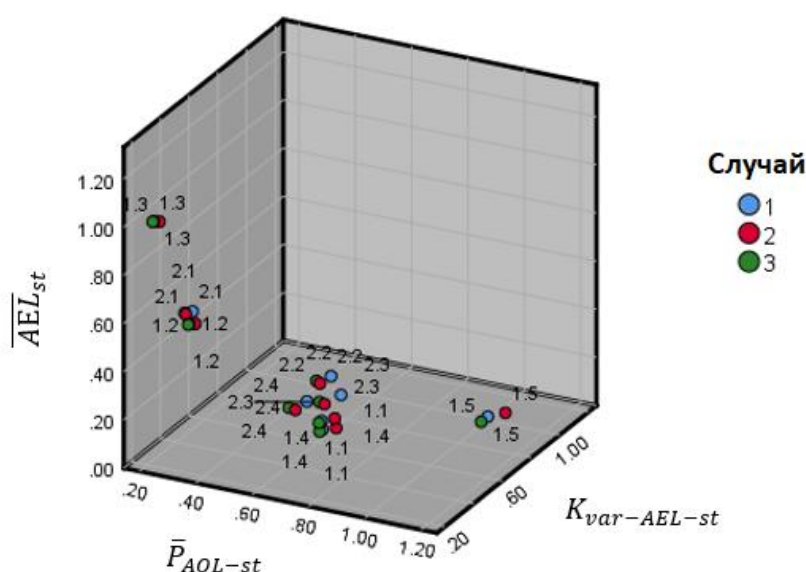
По-слабо се оказва, че влияе вторичният компонент на хоризонталното отместване, като зависимостта между неговата величина и избегнатите загуби по руда приблизително следва зависимост близка до крива от втора степен (фиг. 3.27). Нужно е да се посочи, че за изведените зависимости не се е целяло да се получат достоверни регресионни уравнения, а те единствено служат за илюстрация на съществуващата взаимовръзка между величините.



Фиг. 3.27. Установена зависимост между избегнатите загуби по руда и дължината на вторичния компонент на вектора на хоризонталното отместване

Представените фигури са за руден полигон 1-2, като за останалите рудни полигони на двете подстъпала се наблюдават аналогични зависимости. Следователно по този начин се доказва, че вторичният компонент, макар да не притежава силна корелационна зависимост с дължината на тримерния вектор на отместването, той се оказва важен за реализирането на загуби по руда в случай, че се пренебрегне ефектът на взривното отместване.

Въз основа на получените резултати за изследваните полигони от двете подстъпала показателите AEI_{st} , $K_{var-AEI-st}$ и $\bar{P}_{AOL-st}$ се нанасят в тримерна координатна система (фиг. 3.28).



Фигура 3.28. Приоритетни за проследяване на рудните зони – динамичен подход

От получените резултати може да се посочи, че ключови за проследяване се явяват полигони 1-2, 1-4 и 1-3 за горното подстъпало и 2-1, 2-4 и 2-3 за долното подстъпало. В сравнение със статичния подход, при предложения динамичен подход се наблюдава разлика в подредбата на приоритетните полигони на горното.

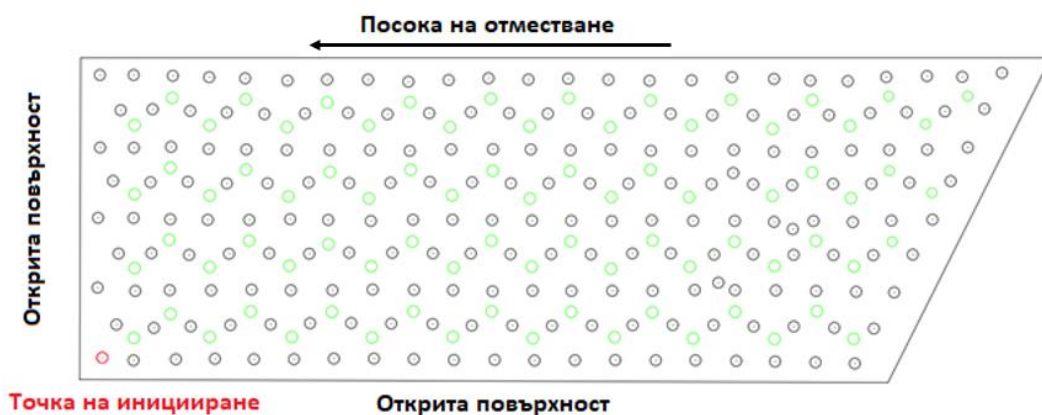
Предимството на подхода е, че той не изисква значителна изчислителна мощност за неговото прилагане. За изчисляването на всеки от случаите на избегнатите загуби са необходими по-малко от 2 секунди изчислително време, което прави метода приложим в практически условия. Това позволява още генерирането и на по-голям обем от случаи (над 10), на чиято база могат да се правят комплексни оценки

в случаите, когато трудно може да се получи еднозначно ранжиране на приоритета за проследяване на рудните зони.

Основен недостатък на метода е, че не отчита разликите на отместването в отделните участъци на взривяваното поле, както и разликата на разбухването в тях. Въпреки това моделът може да се прилага успешно в тези случаи, при които очакваната разлика между показателите на отместване за отделните датчици във всяко взривяване нямат голяма разлика в своите стойности или съществува известна средна величина на дължината на взривното отместване. Освен това използването подхожда на статистическото моделиране позволява моделът да бъде надграден, отчитайки зависимостта между разбухването на взривената скала и увеличаването на височината на взривения куп. Друг недостатък на метода е, че той е приложим след натрупването на известен брой наблюдения за резултатите, получавани при даден паспорт на ПВР. Ако за даден рудник на взривяване се използват средно по 8 ВММ датчика, то най-малко след 14 бр. взривявания ще бъде осигурен необходимият минимум от наблюдения (100 бр.) за прилагане на този подход. Необходимо е да се посочи, че тъй като резултатите за избегнатите загуби по руда са силно чувствителни към вида на разпределението на показателите на отместването, то прилагането на разпределение, различно от установеното може силно да изкриви получените резултати и да доведе до вземането на грешни решения. Затова е необходимо създаването на база данни, която се обогатява по време на разработването на находището съобразно работата при различните минно-геоложки условия с напредването на минно-добивните работи. Именно чрез увеличаване на броя наблюдения, съхранявани в нея, може да се подобри точността на оценката чрез намаляване на репрезентативната грешка. По този начин се подобрява и оценката за това кои зони са най-приоритетни за проследяване. След проиграването на достатъчен брой случаи в зависимост от сложността на пространственото разпределение на рудните зони и полезния компонент в тях за взривяваното поле, може да се получи достатъчно добро приближение на действителната стойност на потенциално избегнатите загуби.

III.3.3. Резултати от прилагането на комплексен подход за трета апроксимация

При приложения комплексен подход се цели придобиването на по-пълна информация за най-рационалното поставяне на всеки ВММ датчик в полето. На базата на определени точки от взривяваното поле се прогнозира дължината на вектора на отместването в съответните зони чрез модела, базиран на машинно обучение. По този начин чрез изкуствено генерирани вектори се получава максимално пълна прогнозна картина за отместването преди самото взривяване. За примерното поле дължината на вектора на отместването е получена за 81 точки с цел моделиране на векторното поле на взривно отместване (фиг. 3.29).



Фиг. 3.29. Местоположение на точките, използвани за прогнозиране на векторното поле на взривното отместване по известни данни, получени от модела, базиран на машинно обучение (в зелено)

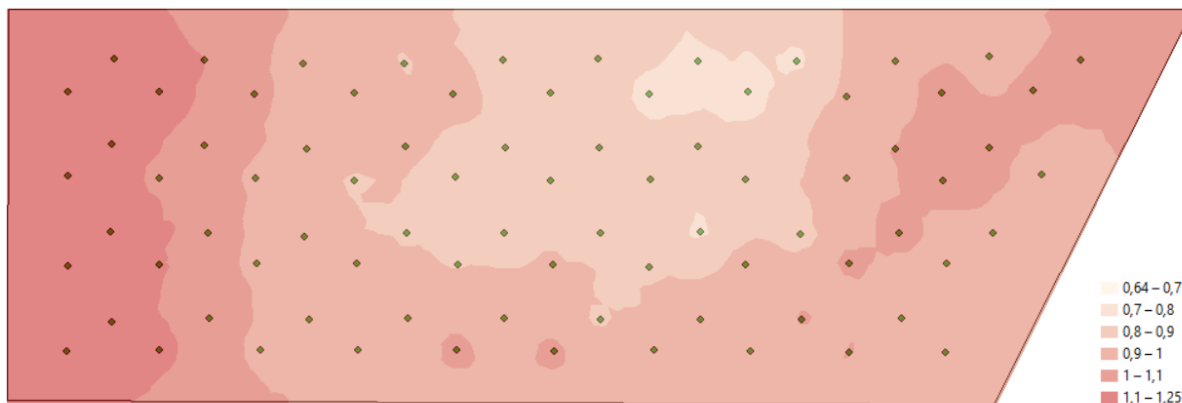
Избраните точки са между трите най-близки сондажа за всеки ВММ датчик, тъй като създаденият регресионен модел, базиран на машинно обучение, функционира по този начин. Входящите променливи, приложени за регресионния модел (XGBoost), са табулирани за всяка от точките, след което са

използвани като входни данни за прогнозиране на хоризонталния вектор за тях. След получаването на неговата дължина, са приложени интерполационни методи, известни в геостатистиката, за прогнозиране на отместването на точките на отделните рудни полигони за двете подстъпала.

Резултати от приложение на метод на Shepard (IWD)

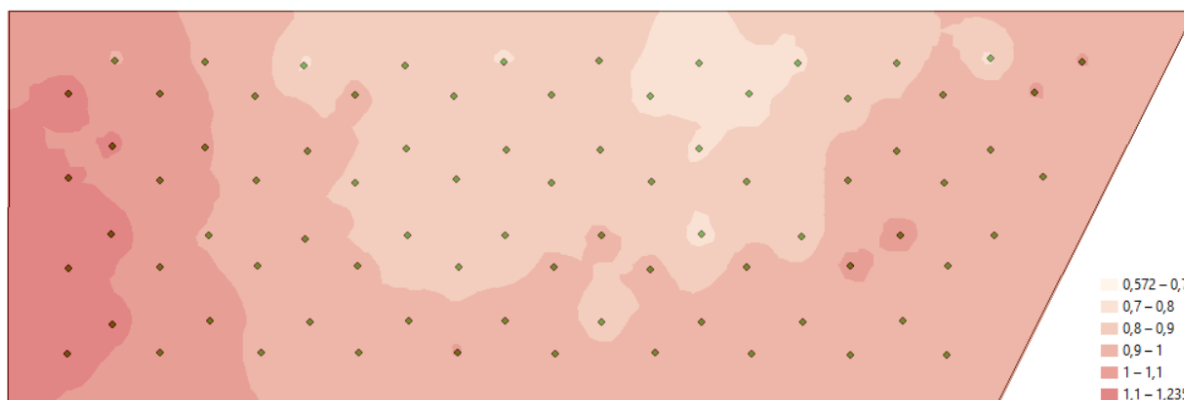
След приложение на метода при степенен показател $n=1$ за двете подстъпала се получава следния модел на отместването за взривяваното поле (фиг. 3.30, 3.31).

Горно подстъпало



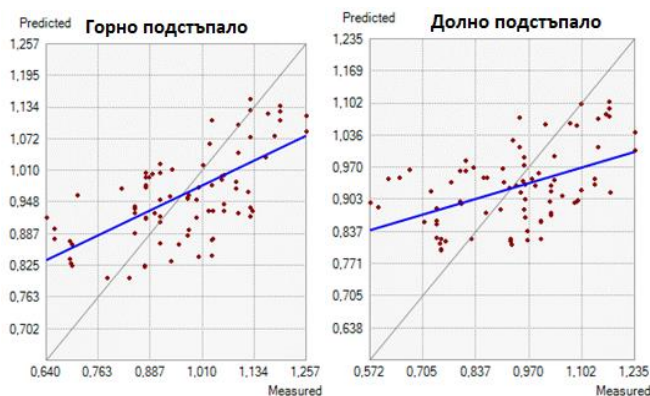
Фиг. 3.30. Прогноза за отместванията на горно подстъпало по метода на Shepard (IWD)

Долно подстъпало



Фиг. 3.31. Прогноза за отместванията на долно подстъпало по метода на Shepard (IWD)

На фиг. 3.32 е представена точността на модела при прогнозиране на отместването в дадена точка на базата на известни стойности на вектора.

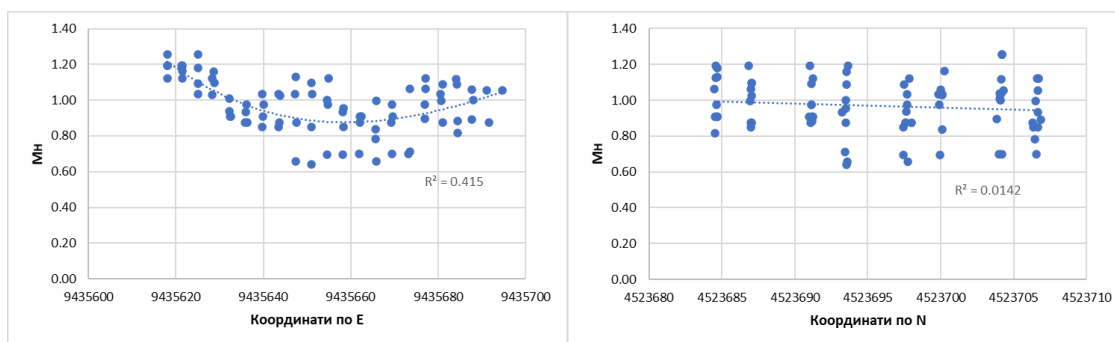


Фиг. 3.32. Установени зависимости между прогнозните и действителните стойности на дължината на вектора на отместването за горно и долно подстъпало посредством приложението на метод на Shepard (IWD)

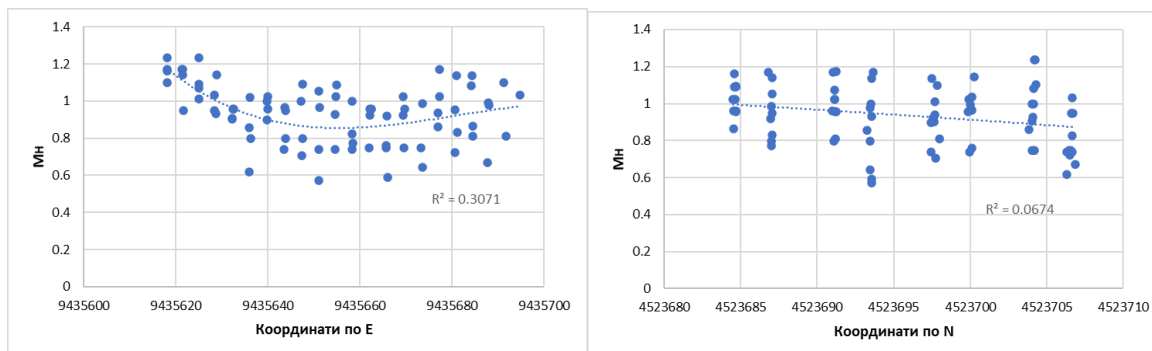
Въпреки простотата на метода, той се оказва неточен. Грешката в случая се равнява на 0,11 m за горното подстъпало и на 0,14 m за долното, което е пренебрежимо за условията на работа на рудника, но не съществува висока корелация между прогнозните и действителните величини на вектора. Въпреки това с цел по-точното моделиране на местоположенията на рудните зони е необходимо да се разгледат вариантите на приложение и на други по-сложни интерполационни методи.

Резултати от приложение на универсален кригинг

Аргументът за използването на обикновен кокригинг се дължи на слабата корелационна връзка между стойностите на изследваната променлива и широчината на изследваното поле. Съществува известна тенденция за промяна в хоризонталното отместване в редовете по-близки до откритата повърхност по посока на самото отместване, но тя е умерена ($R=0,644$ за горно подстъпало и $R=0,554$ за долно подстъпало) (фиг. 3.33 и фиг. 3.34).



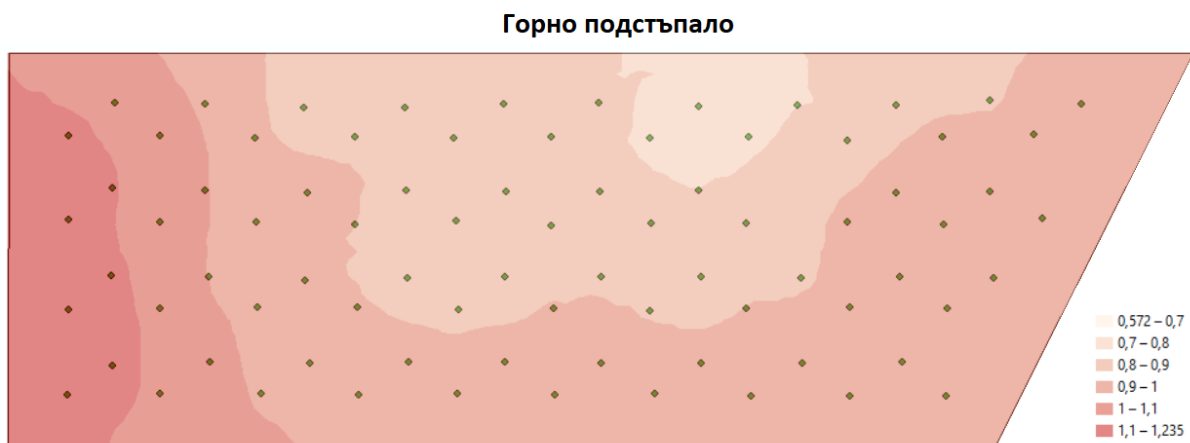
Фиг. 3.33. Наличие на умерена пространствена корелация на отместването за горното подстъпало



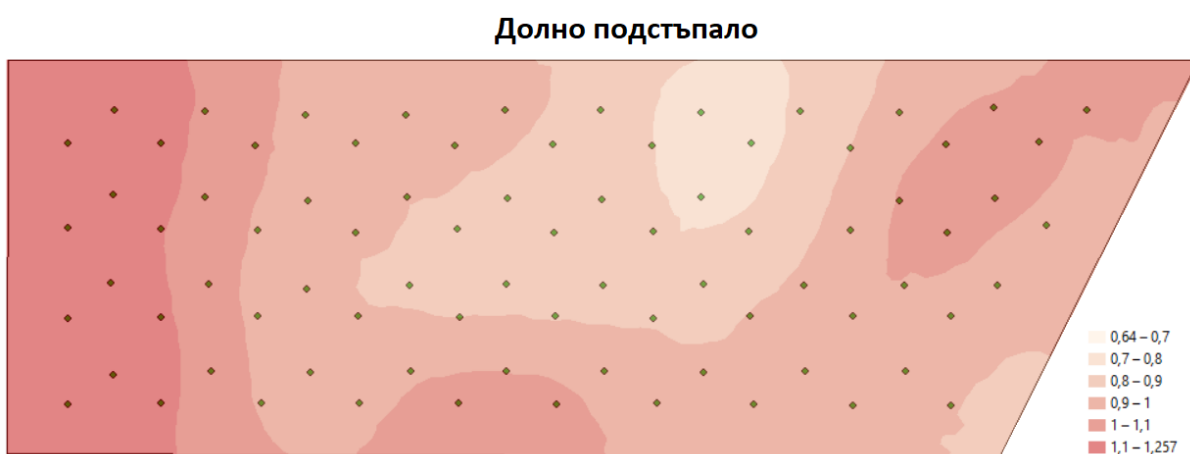
Фиг. 3.34. Наличие на пространствена корелация на отместването за долното подстъпало

Самата зависимост по оста E е описана с полином от трета степен. При прилагането на универсален кригинг за всяко от двете подстъпала бе използвана полувариограмата, прилагайки Гаусова функция, като най-удачна за множеството от средни стойности по отделните класове в предварително създадена хистограма

На фиг. 3.37 и фиг. 3.38 са представени растерни диаграми на предполагаемите дължините на векторите на отместване във векторното поле на взривното отместване за примерното поле.

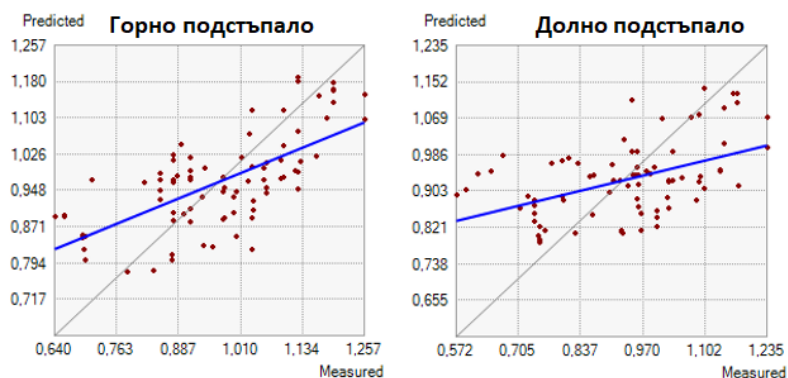


Фиг. 3.37. Прогноза за отместванията на горно подстъпало по метода универсален кригинг



Фиг. 3.38. Прогноза за отместванията на долно подстъпало по метода универсален кригинг

На фиг. 3.39 е представена установената зависимост между прогнозните стойности при интерполацията спрямо действителните стойности на дължините на изкуствените вектори.



Фиг. 3.39. Установени зависимости между прогнозните и действителните стойности на дължината на вектора на отместването за горно и долно подстъпало посредством приложението на универсален кригинг

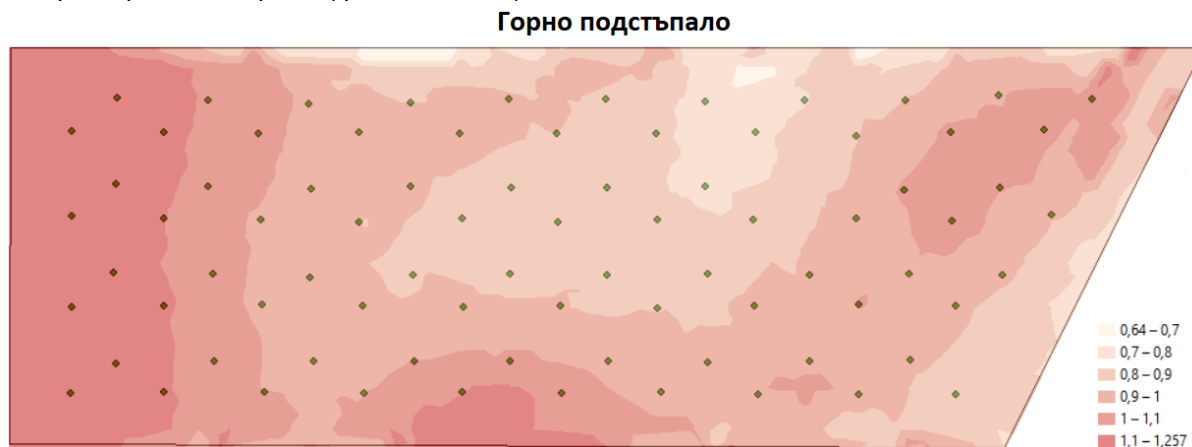
Грешката на интерполационния модел е 0,11 m за горното подстъпало и 0,13m за долното. От фигурата може да се установи, че използваният интерполационен модел е неточен, но отново на базата на особеностите за разглеждания рудник подобно ниво на грешка би могло да се пренебрегне в определен набор от частни случаи. Грешката на прогностичния модел е незначително по-малка от тази

на метода на Shepard, което означава, че методът на Shepard може да бъде толкова успешно прилаган, колкото и методът кригинг в условията на малко взривно отместване.

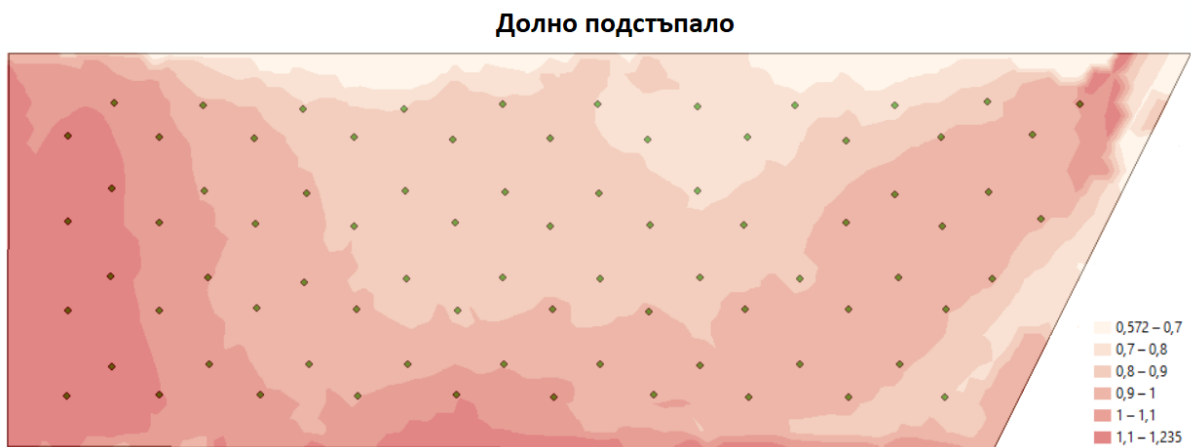
Резултати от приложение на универсален кокригинг

За разлика от предходните два метода, при кокригинга за прогнозирането на отместването в дадена област на взривяваното поле е взета под внимание взаимовръзката между отместването за горното и долното подстъпало. Тъй като бе установено, че съществува силна корелационна зависимост между хоризонталното отместване за двете подстъпала, то е обосновано използването на кокригинг. При него прогнозирането на стойностите за дадена точка се използват двете променливи, за които е известно, че съществува взаимовръзка между тях.

Предполагаемото разпределение на дължините на хоризонталния вектор във векторното поле е показано на растерните диаграми (фиг. 3.40, 3.41).

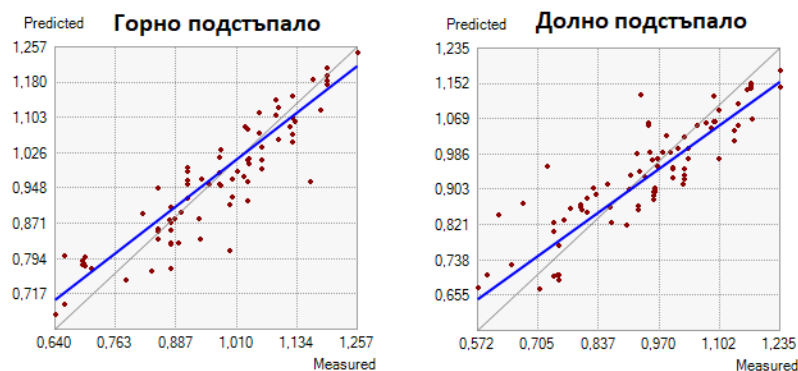


Фиг. 3.40. Прогноза за отместванията на горно подстъпало по метода универсален кокригинг



Фиг. 3.41. Прогноза за отместванията на долно подстъпало по метода универсален кокригинг

За разлика от другите прогностични модели, наблюдава се значително подобрене на прогнозната точност при този метод. За горното подстъпало RMSE на прогнозата се равнява на 0,061 m, а за долното – 0,077 m. В практически условия подобно ниво на точност напълно отговаря на промишлените условия. Въпреки това, при него съществуват известни неточности, за които е необходимо търсенето и на други решения за извършването на интерполация. На фиг. 3.43 е показана зависимостта между прогнозните и действителните стойности за вектора на отместването за горното и долното подстъпало.

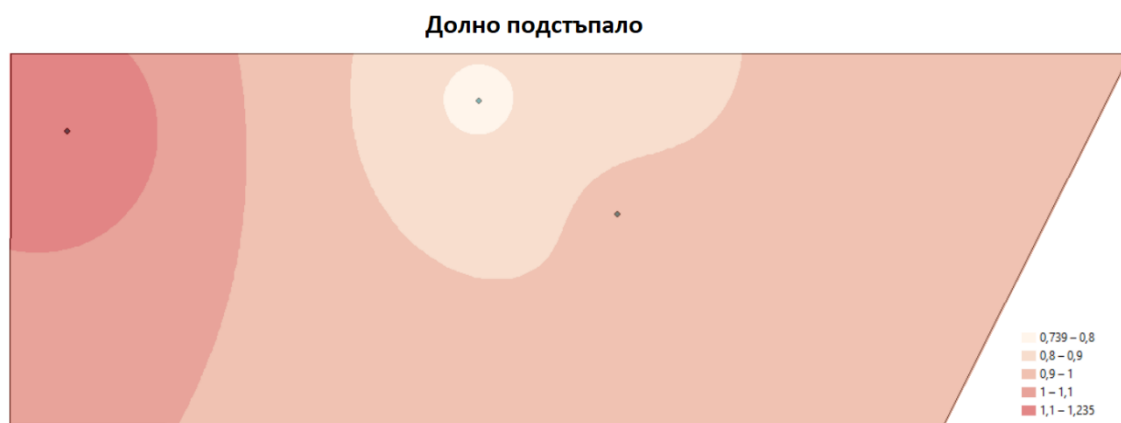
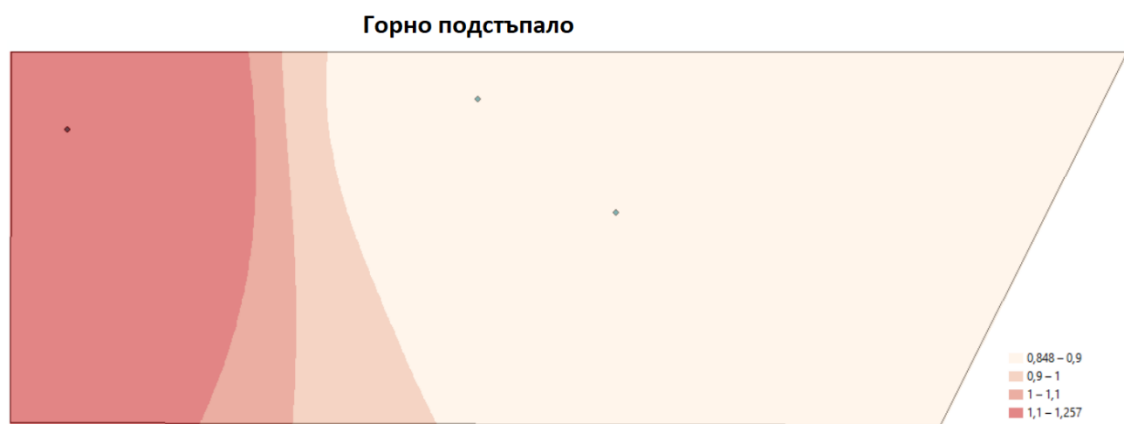


Фиг. 3.43. Установени зависимости между прогнозните и действителните стойности на дължината на вектора на отместването за горно и долно подстъпало посредством приложението на универсален кокригинг

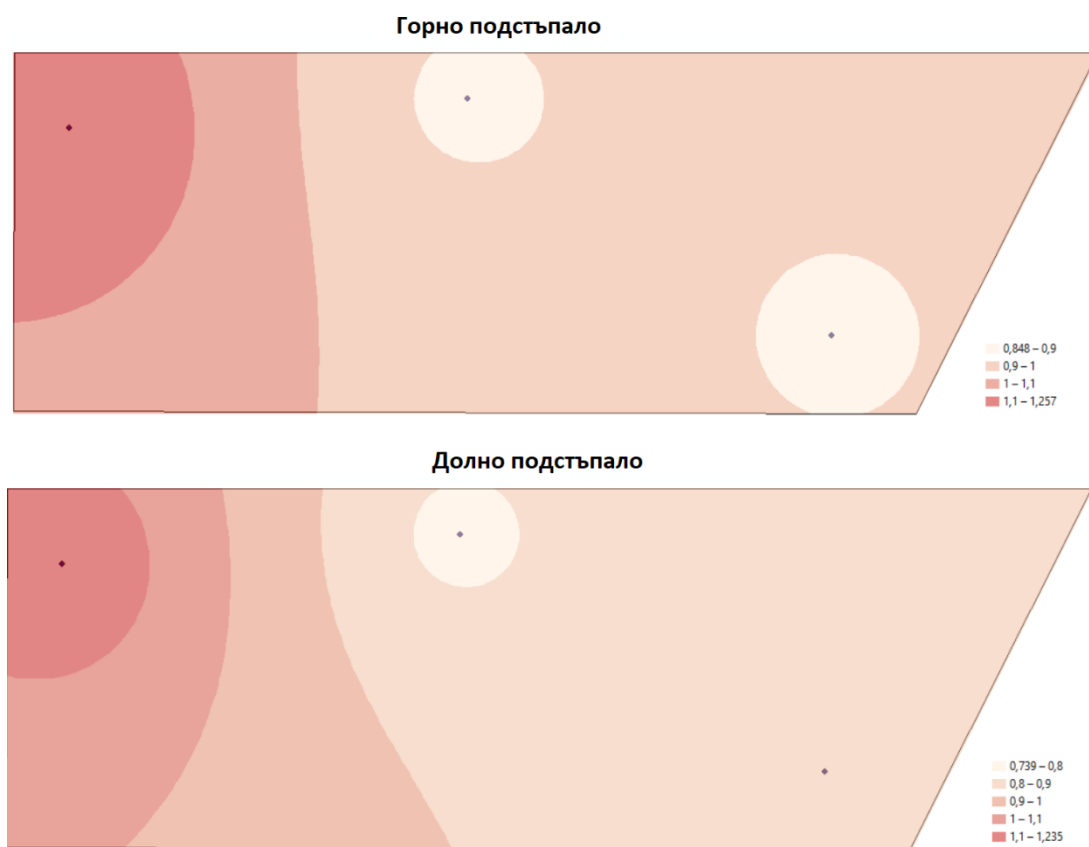
Следователно като обобщение може да се посочи, че за получаването на по-пълнен модел на векторното поле на взривното отместване е необходимо разглеждането на взаимовръзката между отделните подстъпала при бъдещото разглеждане на аналогични проблеми. Въпреки известните отклонения на интерполационния модел, необходимо е да се отчете, че точността на цялостния модел за създаване на векторното поле на взривното отместване зависи до голяма степен от способността на методите на машинно обучение да прогнозира правилно вектора на хоризонталното отместване.

За разглежданото взривно поле могат да бъдат поставени най-много 4 на брой датчика от разгледаните 81 възможни местоположения, по такъв начин, при който не се получава припокриване на сигналите, излъчвани от BMM датчици от една серия. При разглеждането на проблема за поставянето на малко на брой датчици за взривяването поле за нуждите на разглежданото взривно поле, методът на Shepard може да се приложи, тъй като е лесен за изчисление, а полученият интерполационен модел не се отличава по точност от тези при използването на кригинг. Това се дължи именно на малкия брой точкови наблюдения за отместването, които са крайно недостатъчни за получаването на точна оценка. Именно това се оказва основният недостатък при прилагането на известните в практиката геостатистически методи за намиране формата на рудните полигони след взривяване. Като допълнение, методът на Shepard е намерил приложение и в предходно изследване за моделиране на отместването (Taylor, Firth, 2003).

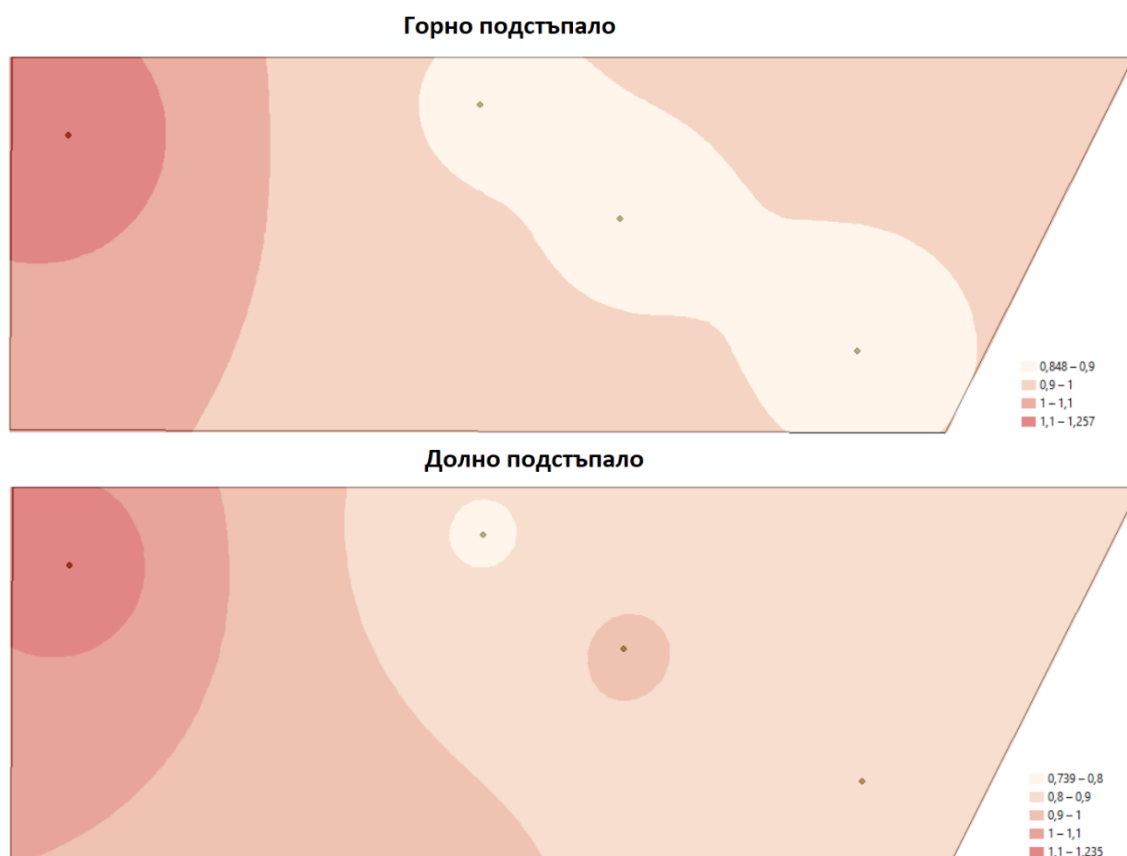
За всяко от местоположението на датчиците е прието, че датчикът отчита дължина на хоризонталното отместване M_H равна на полученото от прогностичния модел, базиран на машинно обучение. На база установеното разпределение на ъгъла α_H са генерирани на случаен принцип 100 реализации за неговата стойност за всяко от местоположенията за разполагане на датчиците. Посредством метода на Shepard са изчислени стойностите на променливите M_{H-ff} и M_{H-dev} за всяка от точките на рудните полигони за 100-те реализации на α_H . Те се приемат за рудните полигони при прилагане на BMM технологията. На фиг. 3.44, 3.45 и 3.46 са представени интерполационните модели на отместването при три разгледани конфигурации за поставяне на датчиците. Самите фигури служат за илюстрация и се базират единствено на променливата M_{H-ff} .



Фиг. 3.44. Интерполационен модел на отместването за Конфигурация 1



Фиг. 3.45. Интерполационен модел на отместването за Конфигурация 2



Фиг. 3.46. Интерполационен модел на отместването за Конфигурация 3

Установи се, че точността на интерполационните модели по 3 до 4 датчика за подстъпало е много ниска, което не позволява получаването на пълна картина на взривното отместване. На табл. 3.34, 3.35 и 3.36 са представени получените резултати, включително и техните стандартизирани стойности. Вместо реализираната печалба са представени максимално възможните маса по руда, която може да бъде добита, с цел запазване на конфиденциалност.

Таблица 3.34. Получени резултати за Конфигурация 1

Рудна зона	$\overline{V_{ore-mined}}$, t	$\overline{V_{waste-mined}}$, t	K_{var-OP} , %	$\bar{P}_{OL}$, %	$\bar{P}_{OD}$, %
ГОРНО ПОДСТЪПАЛО					
1-1	174.12	32.16	32.05%	12.78%	15.59%
1-2	966.89	70.14	3.80%	5.60%	6.76%
1-3	1211.29	40.41	3.60%	3.10%	3.23%
1-4	151.53	21.00	9.62%	12.85%	12.17%
1-5	60.97	23.05	53.00%	26.20%	27.43%
ДОЛНО ПОДСТЪПАЛО					
2-1	1081.43	86.47	5.94%	7.00%	7.40%
2-2	167.50	25.71	9.49%	12.85%	13.31%
2-3	160.63	18.87	9.46%	9.26%	10.51%
2-4	205.75	25.46	8.51%	12.46%	11.01%
Средни загуби: 7,06%		Средно обедняване: 7,59%		Средна печалба: 495 289 USD	
K_{var} загуби: 33,03%		K_{var} обедняване: 30,43%		K_{var} печалба: 3,15%	

Таблица 3.35. Получени резултати за Конфигурация 2

Рудна зона	$\overline{V_{ore-mined}}$, t	$\overline{V_{waste-mined}}$, t	K_{var-OP} , %	$\bar{P}_{OL}$, %	$\bar{P}_{OD}$, %
ГОРНО ПОДСТЪПАЛО					
1-1	173.53	32.75	32.14%	13.07%	15.87%
1-2	965.94	70.59	3.91%	5.70%	6.81%
1-3	1212.07	37.60	3.59%	3.03%	3.01%
1-4	152.77	19.96	9.88%	12.14%	11.56%
1-5	60.45	23.78	60.55%	26.83%	28.23%
ДОЛНО ПОДСТЪПАЛО					
2-1	1079.13	89.51	6.01%	7.20%	7.66%
2-2	166.33	27.09	9.56%	13.46%	14.00%
2-3	164.41	15.45	11.91%	7.12%	8.59%
2-4	203.91	27.71	8.41%	13.24%	11.96%
Средни загуби: 7,09%		Средно обедняване: 7,62%		Средна печалба: 495 087 USD	
K_{var} загуби: 33,24%		K_{var} обедняване: 30,69%		K_{var} печалба: 3,21%	

Таблица 3.36. Получени резултати за Конфигурация 3

Рудна зона	$\overline{V_{ore-mined}}$, t	$\overline{V_{waste-mined}}$, t	K_{var-OP} , %	$\bar{P}_{OL}$, %	$\bar{P}_{OD}$, %
ГОРНО ПОДСТЪПАЛО					
1-1	171.17	35.42	33.48%	14.25%	17.14%
1-2	966.89	72.17	3.81%	5.60%	6.95%
1-3	1202.02	51.85	2.89%	3.84%	4.14%
1-4	149.80	23.42	8.48%	13.85%	13.52%
1-5	60.77	23.43	57.87%	26.44%	27.83%
ДОЛНО ПОДСТЪПАЛО					
2-1	1079.58	88.01	5.69%	7.16%	7.54%
2-2	167.61	25.60	9.16%	12.79%	13.25%
2-3	159.49	20.01	8.25%	9.90%	11.15%
2-4	205.41	26.26	8.10%	12.60%	11.34%
Средни загуби: 7,44%		Средно обедняване: 8,09%		Средна печалба: 492 418 USD	
K_{var} загуби: 27,84%		K_{var} обедняване: 25,54%		K_{var} печалба: 2,79%	

На база на получените резултати може да се приеме, че най-рентабилно е да се приеме Конфигурация 1 пред останалите две, тъй като при нея може да се реализира максимална печалба от трите разгледани случаи.

При множество извършени наблюдения J. Loeb и D. Thornton (2014) установяват, че съществува възможност използването на по-голям брой датчици за дадено поле да доведе до по-високи загуби. Въпреки че тези случаи не са типични, тяхното отчитане се явява ключово при търсенето на оптимален начин за получаване на максимален икономически ефект при наличието на недостатъчна информация за резултата от взривното отместване. Независимо от това, трябва да се отчете, че при използването на по-голям брой датчици в разгледания случай намалява коефициентите на вариация, което означава, че се намалява риска от реализиране на събитие с различна стойност от очакваната. На тази база посредством приложението на прогностичния модел може да се установи при коя конфигурация на поставянето на датчиците в масива може да се получи най-малко изкривена информация за местоположението на рудните зони, на базата на използването на крайно недостатъчен брой наблюдения за създаване на точен модел на взривното отместване.

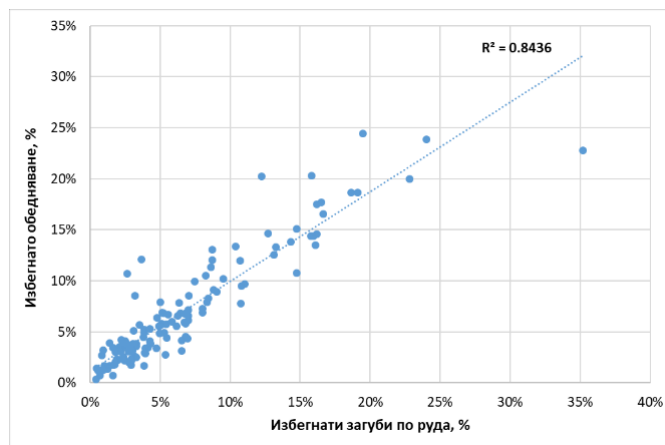
Тъй като създаването на блоков модел на взривения куп представлява сложна задача сама по себе си, на този етап не е разгледан този подход при търсенето на най-подходящи местоположения за

поставяне на BMM датчиците. Въпреки това въз основа приетия опростен метод посредством използването на рудните полигони може да се приеме, че се получава решение, което да удовлетворява нуждите на планирането на взривните работи, макар и решението да бъде апроксимирано. След локализирането на рудата във взривения куп след да бъдат определени границите на добивния блок по някои от известните алгоритми (Vasylchuk & Deutsch, 2019). Независимо от вида на използвания алгоритъм за изчисляване на местоположенията на рудните зони, предложените подходи в дисертацията могат да бъдат използвани като базови за оценяване на изкривяването на информацията, която се получава при отделните случаи на поставяне на BMM датчиците в различни зони от полето спрямо информацията, получена от прогнозирания еталонен модел.

III.4. Икономически ефект като резултат на приложения подход за моделиране

III.4.1. Икономически ефект от приложената технология за проследяване на отместването

Въз основа на изчисленията от алгоритъма на BMT, системното използване на BMM датчици води до избягването на загуби на стойност над 6,1 млн. USD за периода на изследването. За това време са вложени над 1200 датчика, като разходите за прилагането на технологията възлизат на над 312 хил. USD при приета единична цена на BMM датчик от 260 USD. Използвайки най-простия финансов показател възвращаемост на инвестициите (ROI) може да се установи, че вложените средства в технологията се възвръщат над 18 пъти ($ROI=1860\%$). Естеството на взривната динамика, което варира в по-тесни граници в сравнение с други рудници по света, използващи технологията, води до това, че по-голям процент от случаите на избегнатите загуби и обедняване са в интервала от до 5% при средно ниво на избегнатите загуби 6,59% и средно ниво на избегнатото обедняване от 6,96%. Следователно пренебрегването на активните фактори, представляващи предпоставки за образуване на подобен процент от загуби при добива на скъпоструваща суровина каквато се явява златото, може да доведе до реализирането на значителни финансови загуби за рудника. Освен това, се установи много тясна взаимовръзка между процентите на обедняването и загубите по руда. От изведената зависимост следва, че минимизирането на един от двата негативни феномена води до намаляването и на другия (фиг. 3.48).



Фиг. 3.48. Зависимост между избегнатите загуби по руда и избегнатото обедняване

Необходимо е да се спомене, че част от авторите, разглеждащи аналогични проблеми, считат, че икономическият ефект, изчислен по методиката на BMT е до известна степен завишен (Poraee et al, 2019; Hmoud & Kumral, 2021). Това от своя страна налага търсенето на други алтернативни методи за създаване на по-точен еталон, на базата на който могат да се съпоставят резултати при различни случаи. Независимо от това, при разглеждането на находище, малкият вектор на отместването свидетелства, че наличието на евентуално завишаване на икономическата ползва от прилагането на технологията на BMT е минимална. Освен това, на базата на направените изчисления посредством динамичния подход се установи още, че процентът на избегнатите загуби за дадена рудна зона могат значително да варират в зависимост от реализирания вектор на отместването. При увеличаване на относителния разход на BV се увеличава и векторът на отместването, което неминуемо води и до увеличаване на процента на

загубите по руда в случай, че не се отчете ефекта на отместването. Именно на тази база се твърди, че за бъдещото развитие на минните работи на разгледания рудник и прогнозното увеличаване на относителния разход на ВВ, крайно необходимо е продължаването на използването на ВММ технологията. По този начин реализираният икономически ефект при продължаване на разработването на находището се очаква да бъде по-голям от описания.

III.4.2. Икономически ефект от създадената методика за оценка на приоритетните за проследяване рудни зони

Въпреки значителното намаляване на загубите и обедняването на рудата все още съществуват резерви за подобряване на цялостния процес по моделиране на взривното отместване. Съществува икономически ефект, който може да се реализира в случай, че се продължи използването на методиката на ВМТ (или метод, близък до нея подобен на метода на Shepard) за определяне на границите на рудните полигони след взривяването. В зависимост от избора на конфигурация на поставянето на ВММ датчиците, вследствие на информацията, която е получена от интерполационния модел съществува възможност от избягването на допълнителни загуби по руда, равняващи се на стойност 3391 USD (2871 USD от избегнатите загуби по руда и 520 USD за икономията на два датчика) при разгледаното взривяване. Това се равнява на 6092 BGN при настоящ валутен курс и текущите цени на Au (фиг. 3.49).



Фиг. 3.49. Икономически ефект от създадената методика за оценка на приоритетните рудни зони

Разгледаното взривяване в дисертационния труд е при съдържания, които са под средните за цялото находище, което означава, че очакваният ефект от модела може да бъде и по-голям при работа в по-богати участъци за рудника.

III.4.3. Очакван икономически ефект от прилагането на модела, базиран на машинно обучение, за локализиране на местоположението на рудата след взривяване

Вторият очакван икономически модел произтича от прилагането на прогностичния модел, базиран на машинно обучение, в самата практика като нов еталон за определяне на местоположението на рудните зони във взривения куп. Ако се приеме, че рудните полигони, получени от комплексния модел са действителното местоположение на рудата след взривяване, то съществува възможност да се намалят загубите средно с 57,28% за едно взривяване (от 11,7% до 5%). Прието е, че при работа по установените граници от модела, базиран на машинно обучение, се реализират загуби от 5%, дължащи се на изкопно-товарните работи, транспорта на рудата и нейното съхранение на междинен склад. В случая на работа по границите по метода на Shepard е са разгледани 5% загуби поради същите причини, като те са изчислени на база обеднената руда за Конфигурация 1. Необходимо е да се уточни, че алгоритъмът, по който се интерполира взривното отместване за точките от рудните полигони е търговска тайна на ВМТ, а прилагането на метода на Shepard без допълнителна обработка на резултата служи за илюстративни цели. Освен това за реалното приложение на подобен модел в практиката е необходимо да бъдат осигурени допълнително количество данни за дообучаване на модела и неговото практическо изпитание.

ИЗВОДИ И ПРЕПОРЪКИ

От извършената научно-изследователска работа по отношение управление качеството на рудата чрез моделиране местоположението на полезното изкопаемо след взривяване са направени следните основни **изводи**:

1. За ефективното управление на качеството на рудата при открития добив на полезни изкопаеми задължително условие се явява прилагането на числено моделиране на взривното отместване, което се базира на двугодишен период на наблюдения.
2. На базата на направения литературен обзор се установи, че цялостният проблем на взривното отместване се свежда до решаването на три основни задачи: 1) моделиране местоположението на рудните зони след взривяване; 2) определяне на оптималните контури на добивните блокове по определен критерий; 3) определяне на оптималната посока на изземване по определен критерий. Първата задача се оказва основополагаща и служи за решаването на другите две.
3. Изхождайки от промишлените нужди и необходимите мероприятия за осигуряване на емпирични данни, е необходимо прилаганият модел на взривното отместване да изисква влагането на минимални ресурси (време, финансови средства и труд). На тази основа при прилаганите модели в промишлени условия неизбежно се пренебрегват част от слабо въздействащите фактори, свързани с взривното отместване.
4. Установи се, че най-надежден подход за получаването на емпирични данни за естеството на взривното отместване се явява използването на BMM датчици (продукт на BMT), базирани на излъчването на радиосигнал. Към момента технологията се прилага по цял свят при разнородни условия основно при добива на скъпоструващи метали (Au, Ag, Pt, Cu).
5. Подходът, предложен от BMT, за отъждествяване на добивните блокове с отместените граници на рудните зони във взривения куп не е най-точен, но представлява добро приближение за практическите нужди на открития добив на полезни изкопаеми.
6. При използването на известни статистически методи са разкрити общите закономерности на отместването при взривяване. На тази база е установено наличието на значими зависимости между векторните компоненти за двете подстъпала ($R=0,794$ между дължините на хоризонталните вектори).
7. Идентифицирани са основните фактори, имащи съществено въздействие върху взривното отместване. Те включват свойствата на използваните ВВ, физико-механичните характеристики на масива и местоположението на BMM датчика във взривяваното поле.
8. Създадени са прогностични модели с различна точност въз основа на установените групи фактори. Направена е съпоставка между тяхното ниво на приложимост. Създадените модели служат за прогнозиране на хоризонталното отместване в различни зони от взривяваното поле. Най-високата получена точност е при средна абсолютна грешка на прогнозираната величина в порядъка на 23 cm.
9. Създадени са модели за установяване на приоритетните при отместването рудни зони. Приложен е статичен, динамичен и комплексен подход за оценка на приоритета на всеки руден полигон за взривяваното поле.
10. На базата на приложения комплекс от математико-статистически методи и използването на най-надеждния от създадените прогностични модели е създаден числен модел на векторното поле на взривното отместване. Той служи за прогнозиране на местоположението на рудата във взривения куп за изследвания рудник с точност до 6,1 cm за горно подстъпало и 7,7 cm за долно подстъпало.
11. От краен брой конфигурации на поставяне на BMM датчиците за взривявано поле се идентифицира най-целесъобразната конфигурация (Конфигурация 1) от краен брой разгледани, на чиято база се повишава качеството на рудата. Разликата между финансовите резултати от разгледаните конфигурации за взривяването може да достигне до 3391 USD.
12. Установен е икономическият ефект от прилагането на BMM технологията за изследвания рудник, възлизащ на 6,1 млн. USD. Същевременно се създава възможност за реализирането

на допълнителен икономически ефект при прилагането на разработения прогностичен модел (намаляване на загубите с 57,28%).

За подобряване на процеса по управление на качеството на рудата в открития добив на полезни изкопаеми, съгласно изследвания проблем, се определят следните **препоръки**:

1. Систематизиране теоретичните основи за създаването на модел на векторното поле на взривното отместване;
2. Да се продължи прилагането на комплекс от математико-статистически методи за моделиране на векторните компоненти на взривното отместване;
3. Да се извърши по-задълбочено изследване на влиянието на взривното разрушение на скалата върху взривното отместване;
4. Да се изследва приложението на прогностичния модел при разглеждането на алтернативни сценарии за параметрите на ПВР, вида на използваното ВВ, посоката на взривяването и формата на зададените рудни полигони преди взривяването;
5. Да се адаптират създадените методи за прогнозиране взривното отместване и в тримерното пространство и да се изследва тяхната ефективност;
6. Да се подобри точността на прогностичните модели за работа в промишлени условия посредством т. нар. прогресивно обучение и да се внедрят в практиката;
7. Да се приложат и други методи за определяне местоположението на рудните зони чрез създаването на блоков модел на взривения куп;
8. Да се продължи изследването на проблема съобразно определянето на оптималните контури на добивните блокове и оптималната посока на изземване на взривения куп по определени критерии.

НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ И ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

Научни приноси

1. Проучен и обобщен е световният опит за моделиране местоположението на полезното изкопаемо след взривяване в съответствие с проблемите за управление на качеството на рудата в условията на открити рудници.
2. Разкрити са нови закономерности между отделните показатели, определящи взривното отместване – отчитане влиянието на вида на използваното ВВ, отчитане на ефекта на взривните газове, отчитане влиянието на вида на междинния детонатор.
3. Изведени са група локални показатели за всеки поставян ВММ датчик във взривяваното поле с цел придобиване на по-пълна информация за индивидуалните особености на средата около всеки датчик.

Научно-приложни приноси

1. Приложен е комплекс от математико-статистически методи за установяване на неразкрити до момента зависимости между взривното отместване и комплекса от разгледаните фактори. В това число влизат критерий на Wilcoxon, U-критерий на Mann-Whitney, критерий на Kolmogorov-Smirnov, критерий на Levene и копула на Frank.
2. Създадени са регресионни модели за апроксимирано установяване на дължината на хоризонталния вектор на отместване за условията на изследвания рудник. Те се базират на множествена линейна регресия (MLR), многослоен перцептрон (MLP), машина на опорните вектори (SVR) и ансамблов алгоритъм за развиване на регресионни дървета (XGBoost).
3. Приложен е алгоритъмът XGBoost за прогнозиране на хоризонталното отместване в различни зони от взривяваното поле.
4. Съвместно са приложени методи за машинно обучение с геостатистически методи за прогнозиране на векторното поле на отместването при взривяване.

Приложни приноси

1. Създадена е цялостна методика, базирана на количествени методи, за оценяване на приоритета за проследяване на отделните рудни зони при взривното отместване в открити рудници.
2. На базата на машинно обучение е създаден прототипен модел за оценка и избор на рационална конфигурация на ВММ датчиците във взривявано поле от краен брой разгледани конфигурации.

СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ ПО ТЕМАТА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

- **Kaykov, D.**, D. Georgiev. Identifying the dig lines for ore extraction in the case of open-pit mining. Journal of Mining and Geological Sciences, Volume 63, 2020, pp. 63-68
- **Kaykov, D.**, I. Koprev. A stochastic approach for determining the rational places for installing blast movement monitoring sensors in the blasting area. Journal of Mining and Geological Sciences, Volume 64, 2021, pp. 43-48
- **Kaykov, D.**, I. Koprev. A stochastic model for identifying areas of interest in blast movement monitoring. XVI International Conference of the Open and Underwater Mining of Minerals. Varna, Bulgaria, 2021. pp. 106-113

ЛИТЕРАТУРА КЪМ АВТОРЕФЕРАТА

1. Илиев, Л. Теория на моделирането. изд. „Народна просвета“. София, 1986
2. Константинов, Г. Управление на качеството на продукцията в откритите рудници. София, 1997.
3. Стефанов, Н., Яхиел, Н. Качаунов, С. Управление, моделиране, прогнозиране. изд. „БКП“, 1970. София
4. Янков, М. Моделиране и отражение. София, 1984.
5. Tatiya, R.R. (2005). Surface and Underground Excavations: Methods, Techniques and Equipment (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781439834220>
6. Schodde, R. 2010. The Key Drivers Behind Resource Growth: An Analysis of the Copper Industry over the Last 100 Years. Publ. in 2010 MEMS Conference Mineral and Metal Markets over the Long-Term Joint Program with the SME Annual Meeting, Phoenix, USA. MinEx Consulting.
7. Williams, D.A. (1988) Blasting the way ahead. Minerals and Exploration at the Crossroads, The International Outreach, Aus.IMM Annual Conference, Sydney, July 11-15; Parkville: Aus.IMM, pp. 179-180
8. Poupeau, B, Hunt, W and La Rosa, D, 2019. Blast induced ore movement: the missing step in achieving realistic reconciliations, in Proceedings Mining Geology 2019, 309-327 (The Australasian Institute of Mining and Metallurgy: Melbourne) Thornton, D.M. (2009). The Application of Electronic Monitors to Understand Blast Movement Dynamics and Improve Blast Designs. In Sanchidrian (ed.), Proceedings of the Ninth International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting-Fragblast 9, Granada, Spain, 13- 17 September 2009: Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-48296- 7, pp. 287-300.
9. Isaaks, E, Barr, R, and Handayani, O, 2014. Modeling blast movement for grade control, in Proceedings Ninth International Mining Geology Conference 2014, (The Australasian Institute of Mining and Metallurgy: Adelaide).
10. Vasylichuk, Y.V., & Deutsch, C.V. (2019). Optimization of Surface Mining Dig Limits with a Practical Heuristic Algorithm. Mining, Metallurgy & Exploration, 1-12.
11. Agoston, M. K. Computer graphics and geometric modelling: implementation and algorithms. Springer; 1 edition (January 4, 2005)
12. Burrough, P. A. Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment. New York: Oxford University Press. 1986.
13. Hmoud, S, Kumral, M. Simulation of Blast-Induced Movements in Open Pit Mining Benches. Proc. 10th International Drilling and Blasting Symposium, 25-26 November 2021, Antalya, Turkey, pp. 119-130
14. Hmoud, S., Kumral, M. Effect of Blast Movement Uncertainty on Dig-Limits Optimization in Open-Pit Mines. Nat Resour Res 31, 163–178 (2022). <https://doi.org/10.1007/s11053-021-09998-z>
15. Huang, J., Koopialipoor, M. & Armaghani, D.J. A combination of fuzzy Delphi method and hybrid ANN-based systems to forecast ground vibration resulting from blasting. Sci Rep 10, 19397 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-76569-2>
16. Hustrulid, W., Kuchta, M., Martin, R. (2013). Open pit mine planning & design. Vol. 1 Fundamentals (3rd ed.). CRC Press
17. Li, E., Yang, F., Ren, M., Zhang, X., Zhou, J., Khandelwal, M. Prediction of blasting mean fragment size using support vector regression combined with five optimization algorithms, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, Volume 13, Issue 6, 2021, Pages 1380-1397, ISSN 1674-7755, <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2021.07.013>.
18. Loeb, J., Thornton, D.M. (2014). A Cost Benefit Analysis to Explore the Optimal Number of Blast Movement Monitoring Locations. Proc. Ninth International Mining Geology Conference 2014, Adelaide, SA, Australia, 18-21 August 2014: Australia Institute of Mining and Metallurgy, pp. 441-449
19. Lu, X., Hasanipanah, M., Brindhadevi, K. et al. ORELM: A Novel Machine Learning Approach for Prediction of Flyrock in Mine Blasting. Nat Resour Res 29, 641–654 (2020). <https://doi.org/10.1007/s11053-019-09532-2>

20. Shepard, Donald (1968). "A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data". Proceedings of the 1968 ACM National Conference. pp. 517–524. doi:10.1145/800186.810616
21. Taylor, D.L., Firth, I.R. Utilization of blast movement measurements in grade control. Application of Computers and Operations Research in the Minerals Industries, South African Institute of Mining and Metallurgy, 2003.
22. Vatti, B. A generic solution to polygon clipping. Communications of the ACM, Vol 35, Issue 7 (July 1992) pp 56-63.
23. Yu, Z. X. Shi, X. Miao, J. Zhou, M. Khandelwal, X. Chen, Y. Qiu, Intelligent modeling of blast-induced rock movement prediction using dimensional analysis and optimized artificial neural network technique, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Volume 143, 2021, ISSN 1365-1609, <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2021.104794>.
24. Yu, Z., Shi, X., Zhou, J. et al. Feasibility of the indirect determination of blast-induced rock movement based on three new hybrid intelligent models. Engineering with Computers 37, 991–1006 (2019). <https://doi.org/10.1007/s00366-019-00868-0>
25. Yu, Z., Shi, X., Zhou, J. et al. Machine-Learning-Aided Determination of Post-blast Ore Boundary for Controlling Ore Loss and Dilution. Nat Resour Res 30, 4063–4078 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11053-021-09914-5>
26. Yu, Z., Shi, X., Zhou, J. et al. Prediction of Blast-Induced Rock Movement During Bench Blasting: Use of Gray Wolf Optimizer and Support Vector Regression. Nat Resour Res 29, 843–865 (2020). <https://doi.org/10.1007/s11053-019-09593-3>
27. Zhang, S. (1994). Rock movement due to blasting and its impact on ore grade control in Nevada open pit gold mines (Master's thesis). University of Nevada, Reno, NV, USA
28. Митков, В. Взривна техника и технология. изд. „Св. Иван Рилски“. София, 2020. ISBN 978-954-353-430-2
29. <http://www.angusj.com>
30. <https://blastmovement.com/>
31. <https://www.aspexit.com/spatial-data-interpolation-tin-idw-kriging-block-kriging-co-kriging-what-are-the-differences/>
32. <https://www.datacamp.com/community/tutorials/decision-trees-R>
33. <https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-desktop/resources>
34. <https://www.globalminingreview.com/product-news/28102021/orica-releases-3d-blast-movement-technology/>
35. <https://www.ibm.com/products/spss-modeler>
36. <https://www.ibm.com/products/spss-statistics>
37. <https://www.o-pitblast.com/>
38. <https://www.orica.com/Products-Services/Digital/orepro-3d>
39. <https://www.xlstat.com/en/>
40. <https://xgboost.readthedocs.io/en/stable/>