

**ГОДИШНИК НА  
МИННО-ГЕОЛОЖКИ УНИВЕРСИТЕТ  
„СВ. ИВАН РИЛСКИ“**

**Том 67**

**ANNUAL  
OF UNIVERSITY OF MINING AND  
GEOLOGY “ST. IVAN RILSKI”**

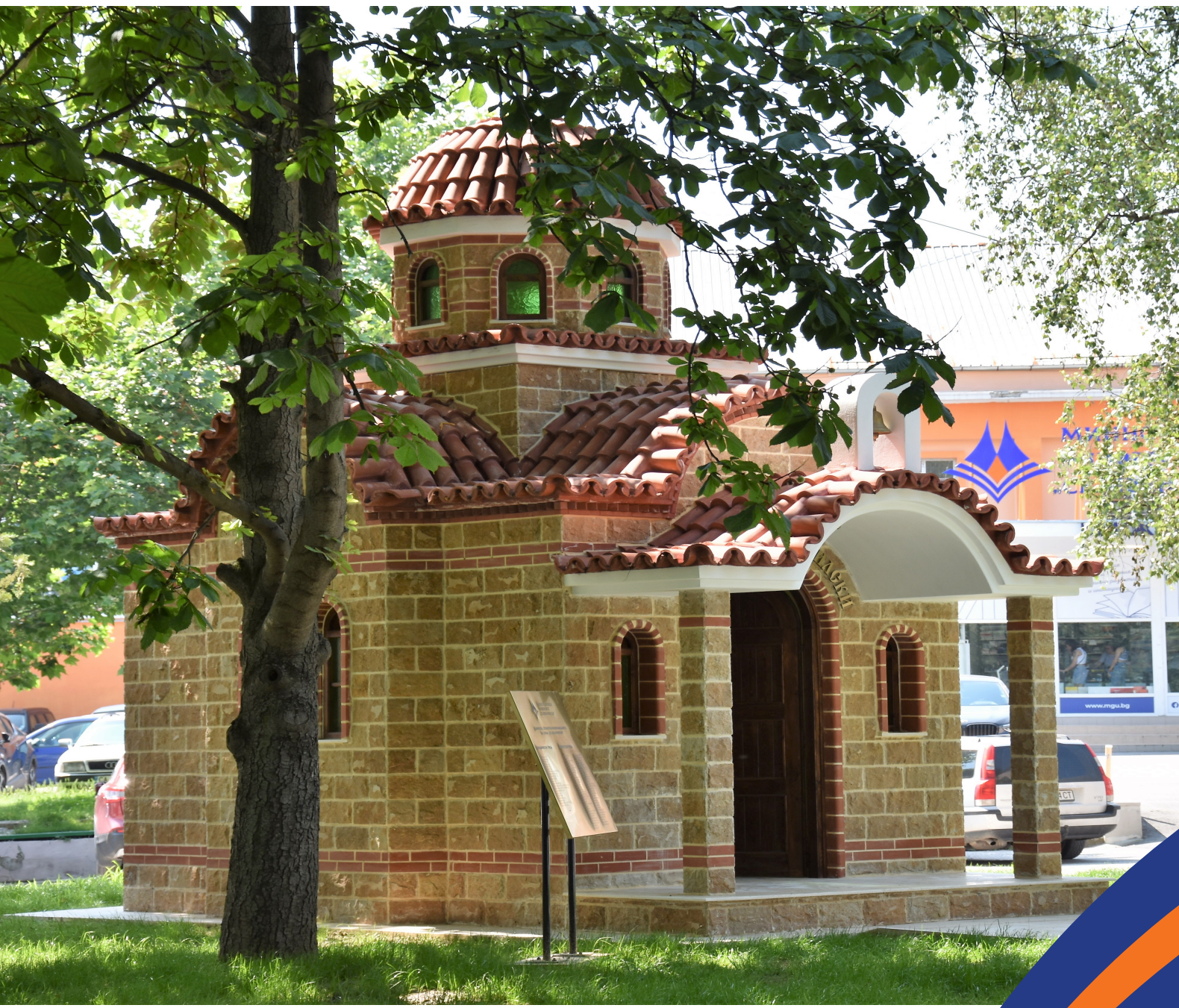
**Volume 67**

**София 2024**

**Sofia 2024**



**МИННО-ГЕОЛОЖКИ  
УНИВЕРСИТЕТ  
„СВ. ИВАН РИЛСКИ“**



**ГОДИШНИК  
НА  
МИННО-ГЕОЛОЖКИ УНИВЕРСИТЕТ  
„СВ. ИВАН РИЛСКИ“ – СОФИЯ**

**ТОМ 67**

**ANNUAL  
OF  
UNIVERSITY OF MINING AND GEOLOGY  
“ST. IVAN RILSKI” – SOFIA**

**VOLUME 67**



**2024**

## **РЕДАКЦИОННА КОЛЕГИЯ**

Доц. д-р Мариана Трифонова – главен редактор

Проф. д-р Маринела Панайотова

Проф. д-р Николай Стоянов

Доц. д-р Борис Вълчев

Доц. д-р Евгения Александрова

Доц. д-р Ясен Горбунов

Доц. д-р Елза Иванова-Димова

Гл. ас. Милена Първанова – стилев редактор английски език

Инж. Костадинка Конакчийска – секретар

## **EDITORIAL BOARD**

Assoc. Prof. Dr. Mariana Trifonova – Editor-in-Chief

Prof. Dr. Marinela Panayotova

Prof. Dr. Nikolay Stoyanov

Assoc. Prof. Dr. Boris Valchev

Assoc. Prof. Dr. Evgeniya Aleksandrova

Assoc. Prof. Dr. Yassen Gorbounov

Assoc. Prof. Dr. Elza Ivanova-Dimova

Chief Assist. Prof. Milena Purvanova – English Editor

Eng. Kostadinka Konakchiyska – Secretary

Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“

1700 София, България

ул. „Проф. Боян Каменов“ 1

<http://www.mgu.bg>

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”,

1, Prof. Boyan Kamenov Str.,

1700 Sofia, Bulgaria

**ISSN 2738-8808 (print)**

**ISSN 2738-8816 (online)**

Издателска къща „Св. Иван Рилски“, София, 2024

Publishing House “St. Ivan Rilski”, Sofia, 2024



# СЪДЪРЖАНИЕ

## CONTENTS

### СЕКЦИЯ ДОБИВ И ПРЕРАБОТКА НА МИНЕРАЛНИ СУРОВИНИ SECTION MINING AND PROCESSING OF MINERALS

- Бегновска, М.** Връзката между бизнеса и образованието – реализирана в учебната практика по „Маркшайдерство при подземно разработване на находища“ **11**  
*Begnovska, M.* The Connection Between Business and Education – Implemented in the Practical Training in *Mine Surveying in Underground Mining of Deposits*
- Борисов, Б.** Влошаване на качествата на стоманобетонните конструкции в резултат на алкало-силициева реакция **16**  
*Borisov, B.* Deterioration of the Quality of Reinforced Concrete Structures as a Result of Alkali-Silica Reaction
- Вацкичева, М., Савов, П., Колев, Н., Величкова, К., Димитров, Д.** Времево разпределение на фини прахови частици и корелацията им с метеорологичните параметри в атмосферата в района около ТЕЦ **21**  
*Vatzkitcheva, M., Savov, P., Kolev, N., Velichkova, K., Dimitrov, D.* Spatial and Temporal Distribution of Fine Particulate Matter and Its Correlation with Meteorological Parameters in the Atmosphere in the Area of a Thermal Power Plant
- Владкова, Б., Димитров, Д., Костадинова, Н., Динчев, З., Македонска, Д., Крилчев, А.** Приложни методи за установяване на експозиция на радон в подземни обекти **27**  
*Vladkova, B., Dimitrov, D., Kostadinova, N., Dinchev, Z., Makedonska, D., Krilchev, A.* Applied Methods for Establishing Radon Exposure in Underground Sites
- Иванов, Р.** Оползотворяване на зелени отпадъци от откривката чрез био-електрохимични системи **34**  
*Ivanov, R.* Utilisation of Green Waste from Mine Overburden Through Bio-Electrochemical Systems
- Колев, Д.** Нова технология за пиролиза на селскостопански отпадъци **38**  
*Kolev, D.* New Technology for Agricultural Waste Pyrolysis
- Колев, Н., Вацкичева, М., Величкова, К., Димитров, Д., Гогурева, А., Атанасов, А.** Анализ на качеството на атмосферния въздух над района на ТЕЦ „София-Изток“ **42**  
*Kolev, N., Vatzkitcheva, M., Velichkova, K., Dimitrov, D., Gogureva, A., Atanasov, A.* Analysis of the Atmospheric Air Quality over the Sofia – East Thermal Power Plant
- Крилчев, А.** Разработване на прототип на дрон за работа в подземни условия **47**  
*Krilchev, A.* Development of a Prototype Drone for Underground Conditions
- Куницка, М., Шлапак, В., Криворучко, А.** Обосновка на методиката за контрол на обемите на съхранение на натрошен камък с използване на геоинформационни системи **51**  
*Kunytska, M., Shlapak, V., Kryvoruchko, A.* Justification of the Methodology of Controlling the Volumes of Crushed Stone Storage Using Geoinformation Systems
- Ляшенко, В., Дудар, Т., Стус, В., Олейник, Т.** Управление на природните ресурси и опазване на околната среда при добива и преработката на полезни изкопаеми **55**  
*Lyashenko, V., Dudar, T., Stus, V., Oliynik, T.* Natural Resource Management and Environmental Protection in Mining and Processing of Minerals



<b>Меразчиев, Г., Трошанова, Н., Несторов, Н.</b> Изследване на обогатимостта на комплексна полиметална руда	<b>65</b>
<b>Merazchiev, G., Troshanova, N., Nestorov, N.</b> Complex Polymetallic Ore Beneficiation Investigation	
<b>Петров, М.</b> Особенности на главните генетични типове промишлени оловно-цинкови находища	<b>69</b>
<b>Petrov, M.</b> Peculiarities of the Major Genetic Types of Economically Important Lead and Zinc Deposits	
<b>Петров, М., Янкова, Т., Григорова, И.</b> Повишаване ефективността на рудоподготовка, чрез оптимизиране на процеса трошене на Pb-Zn руди	<b>75</b>
<b>Petrov, M., Yankova, T., Grigорова, I.</b> Increasing the Efficiency of Pb-Zn Ore Comminution by Optimising the Crushing Process	
<b>Страхилов, Д.</b> Структурен анализ на данни от ориентирана сондажна ядка чрез стереографски метод за целите на подземно минно строителство	<b>80</b>
<b>Strahilov, D.</b> Structural Analysis of Oriented Drill Core Data by a Stereographic Method for Underground Mining Purposes	
<b>Терзийски, Д., Асеновски, С., Копрев, И.</b> Усъвършенствани стратегии за оптимизация за строителство на пътища в открити рудници: подход с акцент върху геотехническата стабилност	<b>84</b>
<b>Terziyski, D., Asenovski, S., Koprev, I.</b> Advanced Optimisation Strategies for Road Construction in Open Pits: an Approach Focusing on Geotechnical Stability	
<b>Трифенова-Генова, В., Тонкова, Г.</b> Върху напрежения около тунел преминаващ през два скални пласта	<b>87</b>
<b>Trifonova-Genova, V., Tonkova, G.</b> On Stresses around a Tunnel Passing through Two Rock Layers	
<b>Янкова, Т.</b> Разработване на технология за обогатяване на смесена руда от меднопорфирно находище	<b>91</b>
<b>Yankova, T.</b> Development of a Beneficiation Technology for Mixed Ore From Porphyry-Copper Deposits	

## СЕКЦИЯ ДОБИВ НА ЕНЕРГИЙНИ РЕСУРСИ

### SECTION EXTRACTION OF ENERGY RESOURCES

<b>Влайкова, О., Бояджиев, М., Георгиев, Л.</b> Влияние на съдържанието на водород в газови смеси при определяне на коефициента на свръх свиваемост	<b>97</b>
<b>Vlaykova, O., Boyadzhiev, M., Georgiev, L.</b> Influence of Hydrogen Content in Gas Mixtures When Determining the Compressibility Factor	
<b>Караджов, М.</b> Анализ на действащата нормативна уредба за проектиране, изграждане, въвеждане в експлоатация и поддръжка на сградни газови инсталации за природен газ и предложения за тяхната актуализация	<b>102</b>
<b>Karadjov, M.</b> Analysis of the Current Regulations for Designing, Construction, Commissioning, and Maintenance of Building Gas Installations for Natural Gas and Proposals for Their Updating	
<b>Крайчев, Е., Плочев, С., Ангелов, А., Грозданов, С.</b> Изследване и опитно определяне на коефициента на масопренасяне по кислород $K_{LA}$ , на нов тип пропелерна бъркачка с планетарен механизъм	<b>105</b>
<b>Kraychev, E., Plochev, S., Angelov, A., Grozdanov, S.</b> Research and Experimental Determination of the Oxygen Mass Transfer Coefficient $K_{LA}$ of a New Type of Stirring Device with a Planetary Mechanism	

**Митков, В.** Съхраняване на водород в подземни газохранилища 110  
*Mitkov, V.* Hydrogen Storage in Underground Gas Reservoirs

**Наливайко, О., Митков, В., Ромашко, О., Моллова, З.** Подобряване на циментирането на 114  
производствените колони в нефтни и газови сондажи с хидрофобни материали от групата  
„RAMSINKS – 2“ при различни минни и геоложки условия

*Nalivayko, O., Mitkov, V., Romashko, O., Mollova, Z.* Improving the Cementing of Oil and Gas Wells Production  
Strings with Hydrophobic Materials of the “RAMSINKS – 2” Group in Various Mining and Geological Conditions

## СЕКЦИЯ ГЕОЛОГИЯ И ПРОУЧВАНЕ НА МИНЕРАЛНИ И ЕНЕРГИЙНИ РЕСУРСИ

## SECTION GEOLOGY AND EXPLORATION OF MINERAL AND ENERGY RESOURCES

**Апостолова, Р., Русков, К., Стойков, С., Попов, К., Климентов, С.** Многомерен 121  
статистически анализ на геохимични данни от златната минерализация в находище  
Обичник, България (предварителни данни)

*Apostolova, R., Ruskov, K., Stoykov, S., Popov, K., Klimentov, S.* Multivariate Statistical Analysis of Geochemical  
Data for the Gold Mineralisation in the Obichnik Ore Deposit, Bulgaria (Preliminary Data)

**Божинова–Попова, И., Малинкова, Е.** Укрепване на дълбок изкоп при сложни 126  
инженерногеоложки условия

*Bozhinova-Popova, I., Malinkova, E.* Strengthening of a Deep Excavation Under Complex Engineering and Geological  
Conditions

**Велев, С., Кръстев, Б.** Хидротермалните промени като инструмент при проучването на рудни 131  
находища: пример от рудопроявление Златуша, Западносредногорска металогенна област,  
България

*Velev, S., Krestev, B.* Hydrothermal Alterations – a Powerful Tool for the Exploration of Ore Deposits: a Case Study  
from the Zlatusha Ore Occurrence, the Western Srednogie Metallogenic Region, Bulgaria

**Вълчев, Б., Съчков, Д.** Триизмерен хроностратиграфски модел на палеогенската система в 135  
най-източната част на Мизийската платформа (Североизточна България)

*Valchev, B., Sachkov, D.* 3D Chronostratigraphic Model of the Paleogene in the Easternmost Part of the Moesian  
Platform (Northeast Bulgaria)

**Вълчев, Б., Съчков, Д.** Проект „Интердисциплинарни изследвания за създаването на 143  
интерактивна база данни и оценка на геоконсервационния потенциал на фосилни  
находища със значима научна и музейна стойност от България“ – преглед на резултатите

*Valchev, B., Sachkov, D.* “Interdisciplinary Research for the Creation of an Interactive Database and Assessment of  
the Geoconservation Potential of Fossil Deposits of Significant Scientific and Museum Value from Bulgaria” – Project  
Results Overview

**Герджиков, Я., Вангелов, Д.** Анализ на ранноалпийската структурна рамка за централната 149  
част на Странджанската зона

*Gerdjikov, J., Vangelov, D.* Analysis of the Early Alpine Structural Framework of the Central Part of the Strandzha Zone

**Иванов, И. Д., Съчков, Д.** Дебелина на морския аградационен пакет, отложен след младия 154  
дриас в слънчевбръгския сектор на българската черноморска ивица, по данни от  
проучвателно сондиране

*Ivanov, I. D., Sachkov, D.* Thickness of the Aggradational Marine Sediments on the Bulgarian Black Sea Coast, Near  
Sunny Beach, Deposited After the Younger Dryas, Based on Exploration Drilling

<b>Иванов, Я., Иванова, И.</b> Геоложки феномени в района на селата Бов и Гара Бов (Западна България)	<b>160</b>
<i>Ivanov, Y., Ivanova, I.</i> Geological Phenomena in the Area of the Villages of Bov and Gara Bov (Western Bulgaria)	
<b>Петков, И.</b> Хидрогеоложки условия в находище на минерални води „Железница“, перспективи за развитие	<b>166</b>
<i>Petkov, I.</i> Hydrogeological Conditions in the <i>Zheleznitza</i> Mineral Water Deposit, Prospects for Development	
<b>Попов, И.</b> Античните медни рудници в Айбунар, Старозагорско	<b>170</b>
<i>Popov, I.</i> The Ancient Copper Mines near Aybunar, the Stara Zagora Area	
<b>Савов, П., Стойков, С., Михайлов, Л., Паздеров, Р.</b> Изследване на топлинното излъчване на телата в зависимост от геометрията на повърхността и структурата им	<b>174</b>
<i>Savov, P., Stoykov, S., Mihailov, L., Pazderov, R.</i> Study of the Thermal Radiation of Bodies Depending on the Geometry of the Surface and Their Structure	
<b>Стоянов, Н.</b> Методичен подход за разработване на математически модели на замърсяването на подземни води от техногенни източници	<b>178</b>
<i>Stoyanov, N.</i> Development of Mathematical Models of Groundwater Contamination from Technological Sources - a Methodological Approach	
<b>Томова, М., Кисъев, А.</b> Приложения и предимства на геофизичните методи в подземни минни дейности	<b>184</b>
<i>Tomova, M., Kisyov, A.</i> Applications and Advantages of Geophysical Methods in Underground Mining	
<b>Тошков, Н., Ялъмов, Ж., Роялски, Г., Свиленов, Л.</b> Кинематичен анализ за оценка на структурно контролирани разрушения в рудник „Елаците“	<b>189</b>
<i>Toshkov, N., Yalmov, Z., Royalski, G., Svilenov, L.</i> Kinematic Analysis for the Evaluation of Structurally Controlled Instabilities at the <i>Elatzite</i> Open-Pit Mine	
<b>Цанков, Хр.</b> Изстребител Месершмит Me 109 G-6: магнитометрични изследвания по следите на една неочаквана находка от втората световна война	<b>195</b>
<i>Tzankov, Ch.</i> A <i>Messerschmitt Me 109 G-6</i> Fighter: Magnetometric Studies on the Trail of an Unexpected World War II Find	

## СЕКЦИЯ МЕХАНИЗАЦИЯ, ЕЛЕКТРИФИКАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ НА МИНИТЕ SECTION MINE MECHANISATION, ELECTRIFICATION, AND AUTOMATION

<b>Арсова-Борисова, К., Христов, В.</b> Особенности на оптимизационните задачи при интелигентните системи	<b>203</b>
<i>Arsova-Borisova, K., Hristov, V.</i> Peculiarities of Optimisation Tasks in Intelligent Systems	
<b>Бойков, И., Въжаров, В.</b> Краткосрочно планиране и създаване на реалистичен график на добивните дейности в рудник „ЕЛАЦИТЕ“, посредством HxGN MinePlan™ Activity Scheduler	<b>208</b>
<i>Boikov, I., Vazharov, V.</i> Short-Term Planning and Outlining a Feasible Schedule of Mining Activities in the <i>Elatzite</i> Mine Using the <i>HxGN MinePlan™</i> Activity Scheduler	
<b>Вучева, Р., Трифонова-Генова, В.</b> Напряжения около хоризонтална минна галерия, преминаваща през напукан скален масив	<b>212</b>
<i>Vucheva, R., V. Trifonova-Genova.</i> Stresses around a Horizontal Mine Gallery Passing through a Cracked Rock Mass	
<b>Джустров, К.</b> Влияние на висшите хармоници при работата на цифрови релейни защиты	<b>216</b>
<i>Dzhustrov, K.</i> Influence of High Harmonics on the Operation of Digital Relay Protections	



<b>Зъбчев, А.</b> Графика на токовете в успоредно свързани вериги <i>Zabchev, A.</i> Chart of Currents in Parallel-Connected Circuits	<b>220</b>
<b>Иванова, М.</b> Напрежения в трансверзално-изотропен скален масив вследствие прокарване на минна галерия <i>Ivanova, M.</i> Stresses in a Transversal Isotropic Rock Mass Due to Driving a Mine Gallery	<b>225</b>
<b>Костов, Г., Александров, Р.</b> Структура на система на електрозадвижване с превключваем реактивен двигател <i>Kostov, G., Alexandrov, R.</i> Structure of an Electric Drive System with a Switched Reluctance Motor	<b>228</b>
<b>Тасев, Л.</b> Методика за оразмеряване на хидравличната система за разтоварване на коша на нископлатформени самосвали <i>Tasev, L.</i> Hydraulic System Dimension Method for Unloading the Basket on Low-Platform Dumpers	<b>236</b>

**СЕКЦИЯ УСТОЙЧИВО РАЗВИТИЕ НА МИНЕРАЛНО-СУРОВИННАТА ИНДУСТРИЯ**  
**SECTION SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF THE MINERAL AND RAW MATERIAL INDUSTRY**

<b>Кондев, Г., Михайлова, И.</b> Структуриран модел за прилагане на цялостно управление на качеството при добива на инертни материали <i>Kondev, G., Mihaylova, I.</i> A structured Model for the Implementation of TQM in Aggregate Extraction	<b>243</b>
<b>Котева, Г.</b> Използване на проектно-базирано-обучение за изграждането на преводачески умения у студенти по инженерни дисциплини <i>Koteva, G.</i> Using Project-Based-Learning in Teaching Translation Skills to Engineering Students	<b>249</b>
<b>Първанова, М., Юсеин, П.</b> Абстракт – въведение в жанра <i>Purvanova, M., Yusein, P.</i> Abstract – Introduction to the Academic Genre	<b>254</b>
<b>Трифонова, Б., Гълъбова, Б., Черчеланов, А., Йонков, Я.</b> Значение на предприемаческата и зелена компетентност в Индустрия 5.0 <i>Trifonova, B., Galabova, B., Cherchelanov, A., Yonkov, Y.</i> The Importance of Entrepreneurial and Green Competence in Industry 5.0	<b>258</b>
<b>Юсеин, П.</b> Развиване на ключови компетентности в процеса на обучение по технически английски като чужд език <i>Yusein, P.</i> Developing Key Competencies in the Process of Technical English Learning as a Foreign Language	<b>264</b>



**СЕКЦИЯ**

**ДОБИВ И ПРЕРАБОТКА НА МИНЕРАЛНИ  
СУРОВИНИ**

**SECTION**

**MINING AND PROCESSING OF MINERALS**





## THE CONNECTION BETWEEN BUSINESS AND EDUCATION – IMPLEMENTED IN THE PRACTICAL TRAINING IN MINE SURVEYING IN UNDERGROUND MINING OF DEPOSITS

**Milena Begnovska**

*University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia, milena.begnovska@mgu.bg*

**ABSTRACT.** Mine surveying knowledge is decisive for the correct, safe, and efficient conduct of mining activities. The quality of the mine surveying service depends on providing a suitable learning environment for future mining specialists. The second-year students, taking a degree in the course of studies in *Mine Surveying and Geodesy* at the University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, annually undergo practical training in the course unit of *Mine Surveying in Underground Mining of Deposits* in an operating mining enterprise. This way, the knowledge obtained during the lecture course is consolidated, and new knowledge and skills are acquired in real conditions. The cooperation between the mining companies and the University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski” provides opportunities for contact with real production conditions and accumulation of rich and varied experience in mining technologies and mine surveying. The connection between business and education facilitates the provision of a learning environment that reflects the realities of modern mining and prepares students for successful careers in this dynamically developing branch of industry.

**Keywords:** education, business, practical training, mine surveying

### ВРЪЗКАТА МЕЖДУ БИЗНЕСА И ОБРАЗОВАНИЕТО – РЕАЛИЗИРАНА В УЧЕБНАТА ПРАКТИКА ПО „МАРКШАЙДЕРСТВО ПРИ ПОДЗЕМНО РАЗРАБОТВАНЕ НА НАХОДИЩА“

**Милена Бегновска**

*Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София, milena.begnovska@mgu.bg*

**РЕЗЮМЕ.** Маркшайдерските знания заемат определящо място за правилното, безопасно и ефективно провеждане на минно-добивните дейности. Качеството на маркшайдерско обслужване зависи от осигуряването на подходяща учебна среда на бъдещите минни специалисти. Студентите от втори курс, специалност „Маркшайдерство и геодезия“ в МГУ „Св. Иван Рилски“, ежегодно провеждат учебна практика по „Маркшайдерство при подземно разработване на находища“ в действащи минно-добивни предприятия. Там те затвърждават получените по време на лекционния курс знания и в реални условия придобиват нови знания и умения. Сътрудничеството между минните компании и Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“ осигурява възможности за контакт с реални производствени условия и натрупване на богат и разнороден опит по минни технологии и маркшайдерство. Връзката между бизнеса и образоването подпомага осигуряването на учебна среда, отразяваща реалностите на съвременното минно производство и подготвя студентите за успешна кариера в тази динамично развиваща се индустрия.

**Ключови думи:** образование, бизнес, практическо обучение, маркшайдерство

### Въведение

Сътрудничеството между минните компании и Минно-геоложкия университет „Св. Иван Рилски“ е от решаващо значение при обучението на бъдещите минни специалисти. Контактът на студентите с реални производствени условия и запознаването им с натрупания богат и разнороден опит по минни технологии и маркшайдерство спомага за осигуряването на учебна среда, отразяваща реалностите на съвременното минно производство. Практическото обучение подпомага затвърждаването на получените по време на курса на обучение теоретични знания, осигурява придобиването на нови знания и умения в реална работна среда, както и развиване на професионални умения, търсени от работодателите. Подготвя ги за успешна кариера в тази динамично развиваща се индустрия.

От 2015/2016 учебна година студентите от втори курс, специалност „Маркшайдерство и геодезия“ редовна форма на обучение, и от 2018/2019 учебна година студентите от задочна форма на обучение, провеждат учебна практика по „Маркшайдерство при подземно разработване на находища“ с продължителност 102 учебни часа в рудниците на „РОДОПИ ЕКО ПРОДЖЕКТС“ ЕООД, гр. Златоград и „ГОРУБСО – МАДАН“ АД, гр. Мадан.

Активният контакт с реални производствени условия и възможността за решаване на специфични, реални маркшайдерски задачи (на земната повърхност и в

рудника) дава възможност за натрупване на практически опит при извършването на маркшайдерски измервания, изчисления, визуализация, анализ и интерпретация на резултатите. Не по-малко значение има и фактът, че по време на провеждането на това практическото обучение студентите придобиват и умения за работа в екип (фиг. 1, фиг. 14). Обучението се провежда според разработена и утвърдена учебна програма.



Фиг. 1. Начален инструктаж

## Маркшайдерски задачи изпълнявани по време на практическото обучение

Изпълнението на задачите, предвидени в учебната програма, изисква знания по геодезия, маркшайдерство, математика, физика, технология на подземния добив, техника на безопасност, информатика, електроника и др. Основният обем от тези знания е получен в процеса на обучението на студентите през първите две години в университета.

При практическото обучение се използват съвременни геодезически и маркшайдерски инструменти и технологии, позволяващи извършването на множество изчисления още по време на провеждането на измерванията, като получените резултати осигуряват много добра основа за последващите графични построения, свързани с изпълнението на конкретните задачи.

Общите задачи, свързани с конкретния минен обект, на който се провежда практиката, се разделят на: Маркшайдерски задачи на земната повърхност и маркшайдерски задачи в рудника.



Фиг. 2. Координиране на подходна точка

На повърхността студентите се запознават с опорната мрежа в района на рудника, след което сами избират място и координират по два независими начина (чрез полигонови и нивелачни ходове, засечки) подходна точка за ориентиране на подземните изработки (фиг. 2, фиг. 3, фиг. 4, фиг. 5). В съответствие с програмата решават различни специфични маркшайдерски задачи, като изчисляване елементите на сондаж от повърхността до предварително определена точка в подземните изработки (посочен ъгъл, наклонена дължина, ъгъл на наклона), трасиране устието на сондажа на повърхността, извършване на ъглово-дължинни и височинни измервания на стабилизирана наблюдателна станция за изследване на деформации в района на вертикална шахта и др. Заснемат промишлената площадка (фиг. 6) и изготвят теренно-ситуационен план на територията на рудника. Съгласно инструкционните изисквания се изобразяват със съответни условни знаци местоположенията на сгради, съоръжения от инженерната инфраструктура, подземни и надземни проводни, устия на минни изработки, пътна мрежа, релеф и хидрография.



Фиг. 3. Извършване на ъглово-дължинни измервания



Фиг. 4. Координиране на точки от полигонов ход



Фиг. 5. Извършване на геометрична нивелация



Фиг. 6. Заснемане на част от промишлената площадка

Маркшайдерските задачи в рудника включват координиране на точките от полигонови и нивелачен ход (фиг. 8) в избран участък на рудника. Извършване на ортогонална снимка. Изготвяне на надлъжен профил на подземните изработки, в които са разположени координираните полигонови и нивелачен ход. Съставяне на напречен профил на галерия на характерни места.

Интересен елемент от инженерна и маркшайдерска гледна точка е проектирането на сбойка, което включва изчисляване на елементите ѝ и задаване на направление по изчислените елементи на сбойката (фиг. 7).





Фиг. 7. Задаване на направление



Фиг. 8. Извършване на геометрична нивелация

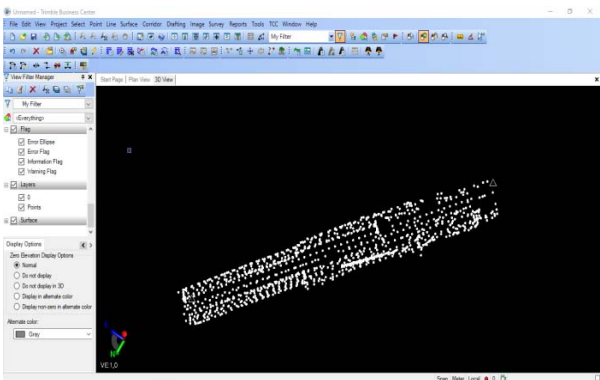


Фиг. 11. Панорамна снимка на промишлената площадка на р-к „Върба – Батанци“, заснета с безпилотен летателен апарат



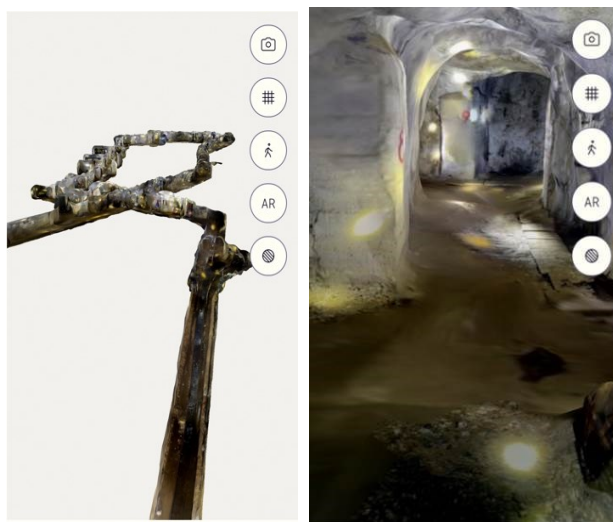
Фиг. 9. Заснемане на контурите на избран участък от минна изработка

Друга интересна задача е заснемането на контурите на минна изработка (фиг. 9, фиг. 10) и построяване на 3D изображение, със съответни изводи и заключения по отношение изчисляването на обема на заснетия участък.



Фиг. 10. Резултат от заснемане на контурите на участък от минната изработка с роботизирана тотална станция

В програмата се включени и още други характерни за маркшайдерската дейност при подземно разработване на находища задачи – определяне надморските височини на точки по различни методи, измерване на дължини чрез различни технологии (с анализ на точността), заснемане района на рудника с безпилотен летателен апарат (фиг. 11), сканиране на част от подземна минна изработка с помощта на портативен LIDAR сензор (фиг. 12, фиг. 13) и др.



Фиг. 12.

Резултат от сканиране на контурите на участък от минна изработка

Фиг. 13.

Всички изпълнявани задачи са съпроводени с извършване на изчисления, изготвяне на необходимите таблични и графични материали, анализ на точността и коментар на получените резултати със съответни изводи и заключения.

Изпълняват се също и множество други задачи, свързани с рудника и маркшайдерския отдел, като запознаване с нормите и правилата за техническата безопасност (фиг. 1), на повърхността в района на рудника и при подземния добив; запознаване с маркшайдерската служба на рудника, с маркшайдерските дейности, с маркшайдерската документация, използваните инструменти и т.н.

Голям интерес сред студентите предизвиква посещението на различни работни места и запознаване с конкретните минно-геоложки условия, и основните технологични процеси на действащ рудник (отделни добивни участъци и прокарвани подготвителни изработки) (фиг. 15, фиг. 16, фиг. 21, фиг. 22, фиг. 23), всичко това в съответствие с нормите за безопасност.

Всяка сутрин преди началото на работата, независимо дали в учебния сектор или в действащия рудник, всички студенти преминават през специален инструктаж по отношение техниката на безопасност, провеждан от отговорника по Техническа безопасност на рудника. Ежедневно се провеждат и организационни дейности по работни групи (фиг. 14).



Фиг. 14. Момент от ежедневната организационна работа по групи



Фиг. 18. Посещение на хвостохранилище „Рудозем – 2“

Там те получават информация относно процедурите за безопасност и реакцията при евентуално възникнали извънредни ситуации. В минно-спасителна служба присъстват на демонстрации за използването на различни видове лични предпазни средства и съвременно оборудване за търсене и спасяване, позволяващо локализиране на евентуално засегнати хора при бедствие или авария.



Фиг. 15. Посещение на различни работни места

Фиг. 16.

По време на практиката студентите имат възможност да проследят цялостния процес от добива на руда до получаването на крайния продукт (концентрат), при посещения в обогатителните фабрики в гр. Рудозем (фиг. 17) и с. Ерма река. Всяка година, по време на учебната практика, се организира и посещение на хвостохранилища „Ерма река“ и „Рудозем – 2“ (фиг. 18). Там студентите се запознават с технологията за съхраняване на отпадните от обогатяването продукти, както и с методите за изследване на деформации, чрез изградените специални наблюдателни станции върху и в близост до преградните стени на съоръженията. За оформяне на крайна оценка студентите предават и защитават изготвения през време на учебната практика отчет.

Не на последно място, бъдещите минни инженери се запознават с дейността на минно-спасителна служба, гр. Мадан (фиг. 19).



Фиг. 19. Посещение на минно-спасителна служба, гр. Мадан

През последните години стана традиция по време на учебната практика да бъдат организирани срещи между студентите от МГУ „Св. Иван Рилски“ и учениците от ПГ „Васил Димитров“, гр. Мадан (фиг. 20). На тези срещи студентите споделят информация и опит по отношение обучението в Минно-геоложкия университет „Св. Иван Рилски“.



Фиг. 17. Посещение на обогатителна фабрика в гр. Рудозем



Фиг. 20. Среща с учениците от ПГ „Васил Димитров“, гр. Мадан





Фиг. 21. Посещение на различни работни места



Фиг. 22. Запознаване с подземната уредба на ВШ „Андрю“

## Заклучение

Учебната практика по „Маркшайдерство при подземно разработване на находища“, в действащо минно-добивно предприятие, предоставя на студентите възможност да натрупат ценен опит при решаване на практически задачи в реална работна среда. По време на това обучение те черпят опит от доказалите се в практиката минни

специалисти от двете минно-добивни дружества, „РОДОПИ ЕКО ПРОДЖЕКТС“ ЕООД, гр. Златоград и „ГОРУБСО – МАДАН“ АД, гр. Мадан, част от които са възпитаници на МГУ „Св. Иван Рилски“.



Фиг. 23. Посещение на работни места на р-к „Върба – Батанци“

Това практическо обучение предоставя и една уникална възможност, някои от студентите да започнат работа или да продължат обучението си чрез участието в стажантски програми към съответното дружество. Учебната практика по „Маркшайдерство при подземно разработване на находища“ е пример за ползотворно сътрудничество между бизнеса и образованието. Осигуряването на практически опит на студентите допринася за развитието на квалифицирана и конкурентоспособна работна сила в минно-добивния сектор, което от своя страна е от съществено значение за дългосрочния растеж и устойчивост на индустрията.

Сътрудничеството, реализирано в учебната практика по „Маркшайдерство при подземно разработване на находища“ за студентите от втори курс, специалност „Маркшайдерство и геодезия“ трябва да продължи, като се обогатява и разширява.

# DETERIORATION OF THE QUALITY OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES AS A RESULT OF ALKALI-SILICA REACTION

**Borislav Borisov**

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia,  
Email: bborisov32@yahoo.com

**ABSTRACT.** The process of concrete quality deterioration due to alkali-silica reaction of aggregates is briefly discussed. The main factors causing the reaction are outlined, along with the prevention measures for newly-built facilities, and the repair and protection of already built ones.

## ВЛОШАВАНЕ НА КАЧЕСТВАТА НА СТОМАНОБЕТОННИТЕ КОНСТРУКЦИИ В РЕЗУЛТАТ НА АЛКАЛО-СИЛИЦИЕВА РЕАКЦИЯ

**Борислав Борисов**

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

**РЕЗЮМЕ.** Накратко е разгледан процесът по влошаване на качествата на бетона, вследствие на алкало-силициева реакция на добавъчните материали. Очертани са основните фактори, предизвикващи протичането на реакцията, мероприятията по превенция при новоизградени съоръжения, както и поправката и защитата на вече построените такива.

### I. Увод

При проектирането и строителството на устойчиви на корозия сгради и съоръжения следва да се вземат предвид климатичните, хидрогеоложките и инженерно-геоложките характеристики на строителната площадка, условията на експлоатация на конструкциите, свойствата на материалите и типа на конструкциите, свойствата на защитните покрития и тяхната устойчивост и дълготрайност при експлоатационните условия (Защита на строителните конструкции от корозия, норми и правила за проектиране, Утвърдени със заповед № 1940 от 27.VI.1980 г. на МССМ и № 335 от 24.VI.1980 г. на КАБ). Дълготрайността, надеждността и качеството на бетонните и стоманобетонните конструкции, се определят от проектирането, особеностите на експлоатационната среда и правилния избор на строителните материали, технологията и качеството на строителното изпълнение, както и адекватната поддръжка по време на съществуването на съоръжението. Проектирането на експлоатационния живот на стоманобетона е един от основните аспекти на икономическата ефективност и устойчивост при съвременното подземно строителство. Осигуряването на стоманобетонните конструкции за необходим времеви период предотвратява разходите за преждевременни ремонтни дейности, както и свързаните с ремонтите функционални разходи. Освен финансовите щети следва да се отчетат рисковете за живота и здравето на населението, както и намалената производителност на труда и екологичните, инфраструктурни и други рискове, произтичащи от аварии и ремонти на инфраструктурата. (Борисов и Павлов, 2024; Борисов и др. 2023; Борисов 2021).

Някои от най-сериозните проблеми, свързани с дълготрайността, възникващи при експлоатацията на стоманобетонните конструкции, са корозията на вградената армировъчна стомана, увреждане поради цикли на замръзване и размразяване, химически въздействия и алкало-силициева реакция. Предмет на

настоящата публикация е алкало-силициевата реакция, добила публичност още като „рак на бетона“.

### II. Механизъм на алкало - силициевата реакция

#### Общи сведения

Влошаване качеството на бетона е естествен процес, който е необходимо да бъде наблюдаван внимателно по време на експлоатацията на строителните конструкции. Алкало-силициевата реакция е бавен процес на разрушаване, който се развива в продължение на десетилетия. Това е реакция на силиция, съдържащ се в добавъчните материали, с алкални съединения в присъствието на влага и калций. От откриването му преди 80 години, разбирането на процеса е затруднено поради променящите се във времето обуславящи го параметри, които не е лесно да се изолират и изследват. Такива параметри са концентрациите и химическия състав на разтворите в порите на бетона, температурата, наличието на влага и др. както е посочено от Albinski (2021).

Процесът на алкало-силициевата реакция първоначално е формулиран в САЩ от Пиърсън като „изследване на опасни добавъчни материали“ (Diamond, 1992). Впоследствие, през 30-те години на миналия век на територията на САЩ и по света са идентифицирани редица конструкции със сериозна степен на дефекти от напукване. През 1940 г. Stanton публикува проучвания, в които заключава, че причината за тези дефекти е реакцията на алкалите от циментовия камък (Na и K) със силициев диоксид от агрегатите. Неговите публикации се считат за първите, които описват алкало-силициевата реакция. Понастоящем е установено, че бетонни и стоманобетонни конструкции по целия свят са засегнати от този вреден процес, като обичайно се наблюдава увреда по бетона няколко десетилетия след построяването им. Например, според Merz et al. (2006), в Швейцария са засегнати няколкостотин съоръжения и това е основно

притеснение за дълготрайността на отговорни съоръжения като тунели, мостове и язовирни стени.

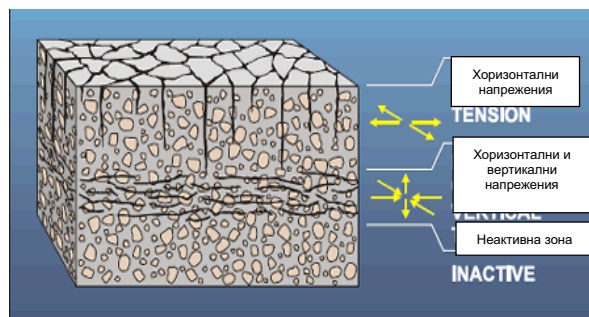
### Алкална реакция на агрегатите

Бетонната смес е сложна многокомпонентна дисперсна система, която се получава непосредствено след добавяне на вода към сместа от цимент и добавъчни материали. Тя се състои от финодисперсни частици на цимент с вода, от зърната на добавъчните материали, от вода и от въвлечения в процеса на приготвянето на сместа въздух. Съгласно Симеонов и др. (1991) в зависимост от количествата на циментното тесто и на добавъчните материали се различават три основни структури на бетонната смес: плаваща, компактна и неплътна структури.

В началния период, наречен период на формиране на структурата, якостта на бетонната смес бавно се увеличава, но в течение на определено време тя все още запазва способността си за значителни пластични деформации. Вследствие на хидратацията на цимента и наличието на достатъчно количество новообразувания, чиито частици се сближават, започва преход от коагулационната структура към кристализационна с рязко нарастване на якостта. В резултат от тези процеси възниква твърдата структура на бетона. Структурата на бетона, образувала се след втвърдяването на бетонната смес е съставена от добавъчните материали и циментния камък, свързал техните зърна, както и от много празнини с различни размери и произход. В бетона се различава макроструктура, представена от структурата едър добавъчен материал, циментно-пясъчен разтвор, едри пори и празнини. Микроструктурата на бетона представлява строежът на компонентите на бетона (циментен камък и добавъчни материали), както и строежът на контактната зона между тях, както е посочено от Симеонов и др. (1991). В резултат на взаимодействието между циментния камък и повърхността на добавъчните материали се формира така наречената контактна зона, която оказва влияние върху свойствата на бетона. Нейната ширина се изменя в границите от 30 до 60  $\mu\text{m}$ . По своя състав и свойства контактната зона се различава от останалия циментен камък.

Порите в бетона са съществен елемент от неговата структура и оказват определено влияние върху свойствата му. Те се образуват поради изпарението на излишната вода, контракцията на циментния камък по време на хидратацията, въвлечането на въздух при изготвянето на бетонната смес, както и в резултат от използването на въздуховъвлечащи добавки. Сравнително по-едри пори и празнини се образуват в бетона също така и поради частично запълване на празнините между зърната на добавъчните материали с циментен камък и недобро уплътнение на циментовата смес. Съществуват и така наречените седиментационни пори, които се образуват поради отделянето на част от направната вода от бетонната смес (Симеонов и др., 1991). Порите съдържат разтвори на йони, резултиращи от хидратационните процеси на цимента. Следователно, химическия състав на разтворите в порите на бетона зависи от състава на цимента. Повърхностите на агрегатите (едрите и дребни добавъчни материали) си взаимодействат като влизат в реакции с химическите съединения, присъстващи в разтворите в порите на контактната зона.

Алкалната реакция на агрегатите (АРА) е химичен процес, при който алкалите, присъстващи в цимента, се комбинират с реакционни съединения, съдържащи се в добавъчните материали при наличие на влага. Тази реакция води до създаване на алкало-силикатен гел, който може да абсорбира вода и да разшири обема си, предизвиквайки напукване и разрушаване на бетона (Sika, 2015).



Фиг. 1. Схематично представяне на напукване на бетон вследствие на АРА (Sika, 2015)

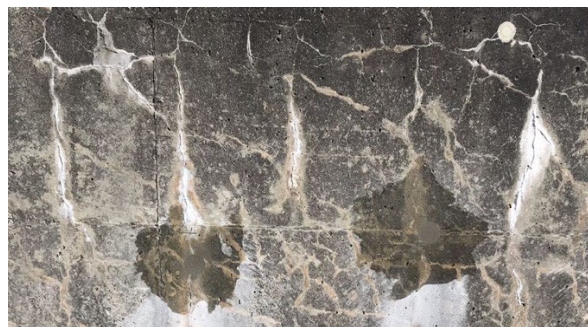
Някои добавъчни материали притежават реакционна способност спрямо алкални окиси ( $R_2O$ ). Симеонов и др. (1991) пишат, че при взаимодействието на  $Na_2O$  и  $K_2O$  с реакционноспособните модификации на  $SiO_2$  (опал, халцедон, тридимит, кристобалит и др., съдържащи се в риолити, риолитови туфи, андезити, андезитови туфи, силициеви шисти, силициеви варовици и др.) се образува гелообразно вещество –  $R_2O \cdot SiO_2 \cdot nH_2O$ , при което новообразуваните вещества са с по-голям обем от изходните, тъй като гелът, поглъщайки вода, увеличава обема си. Това нарушава сцеплението между циментовия камък и добавъчните материали, появяват се напуквания, вследствие на което бетонът се разрушава.

### Алкало - силициева реакция

Алкалната реакция на агрегатите може да приеме три форми:

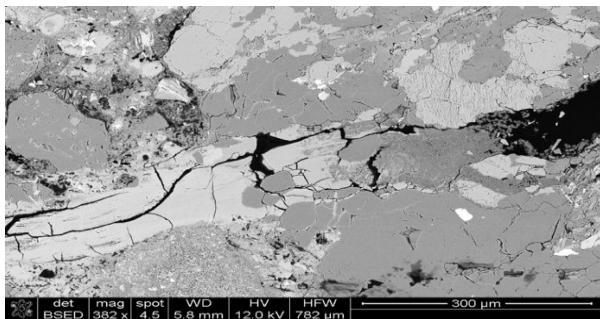
- алкало - силициева реакция;
- алкало - силикатна реакция;
- алкало - карбонатна реакция.

По-голямата част от установените случаи на алкалната реакция на агрегатите е под формата на алкало-силициева реакция (АСР). АСР е преобладаващият механизъм на разрушение и представлява най-съществен интерес за изследователска работа и за строителната практика.



Фиг. 2. Пукнатини по подпорна стена в гр. Берн (Brunig area), вследствие АСР (макроскопско изображение) (Albinski, 2021).





Фиг. 3. Пукнатини и кристализиран гел по подпорна стена в гр. Берн (Brunig agra), вследствие АСР (микроскопско изображение) (Albinski, 2021).

За протичане на алкало-силициева реакция, както и за да се прояви разрушително разширяване на получения гел във втвърден бетон, е необходимо да са налице следните четири фактора (Sika, 2015).

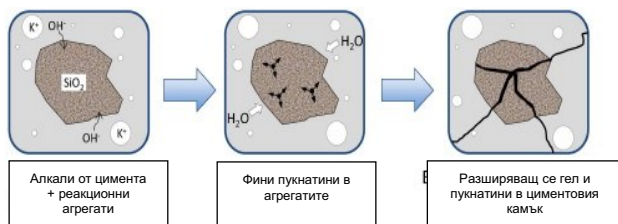
- достатъчно концентриран на алкали разтвор в порите на бетона – източници на алкали могат да бъдат: циментът, активните минерални добавки, добавъчните материали и химически добавки;
- наличие на достатъчно калций – източници от цимента и активните минерални добавки;
- наличие на разтворим в алкална среда силициев диоксид или силикат в инертните материали;
- достатъчно влага в бетона (поне 75 % относителна влажност) – влагата в бетона, както и проникващата от околната среда.

Механизмът на АСР най-общо е следният:

- проникване на алкални метални йони в агрегатите;
- нарушаване на връзките Si = O и вместване на алкали в иначе стабилните и инертни силициеви тетраедри;
- поглъщане на вода, водещо до разширение на продукта от реакцията;
- напукване на бетона, поради вътрешни напрежения, породени от разширението.

Алкало-силициевата реакция е бавна, неравномерна и протича в рамките на десетилетия. Могат да се отделят следните по-основни етапи на АСР:

- първоначален период на взаимодействие между алкалите и разтворимо силициево вещество, съдържащо се в агрегатите и като резултат – образуване на изходния продукт от реакцията;
- бавно разширение на гелообразният продукт, резултиращо във фини пукнатини в агрегатите и по контактната зона;
- процес на по-бързо и значително разширение на гела, причиняващо по-сериозни пукнатини в агрегатите по контактната зона и по циментовият камък до изчерпване на реакционния потенциал на бетона.



Фиг. 4. Основни етапи на протичане на АСР (Marwa et al, 2016)

Добавъчните материали заемат до 80 – 85 % от обема на бетона и оказват определено влияние върху неговите физико-механични свойства, дълготрайност и себестойност. Твърдият скелет от добавъчни материали повишава якостта и намалява деформируемостта на бетона. Степента на реакционна способност на добавъчните материали е функция предимно от коефициента им на дифузия [Kd], концентрацията на алкали [C], времето [t] и радиуса на зърната [R]. Способността за реакция и на едрия (чакъл и трошен камък), и на дребния (естествени и изкуствени пясъци) добавъчни материали за бетон оказва влияние и следва да се оцени и вземе предвид при определянето на бетоновите състави. Потенциалната алкалореакционност на добавъчния материал се изследва чрез минералопетрографски анализ, ускорени химически тестове, обследване чрез измерване на деформациите и изпитване за относително линейно удължение на призматични пробни тела съгласно БДС 14851:2015. Обследванията се извършват по утвърдени методики съгласно редица стандарти, като например: БДС 14851:2015, AASHTO T299, ASTM C227, C289, C586, C1260, C1567, RILEM AAR-3, AAR-4, AAR-8 AAR-13 и т. н.

Реакционният потенциал на бетона и респективно степента на разширение са функция от следните компоненти:

- количество на алкали, вкл. съдържанието им в цимента и общото количество цимент на m<sup>3</sup>;
- присъствие на разтворимо в алкална среда силициево вещество;
- повърхността на зърната на реакционно способните агрегати – зърнометричен състав;
- наличие на алкалореакционни скалообразуващи минерали в изходните материали за агрегатите;
- наличие на влага;
- условия на околната среда (температура и влажност).

### Негативни въздействия вследствие АСР

Авторите на изследване, публикувано в Construction and Building Materials, Volume 95, (2015) информират, че причиненото от АСР напукване има следните негативни въздействия върху качеството на бетона:

- разширение - поведението на гелообразният продукт на АСР способства за разширението и дезинтегрирането на бетона;
- якост на натиск – при по-голямо разширение АСР може да окаже съществено влияние върху якостта на натиск;
- якост на опън при огъване - напукването може значително да намали якостта на опън при огъване на бетона;
- модул на еластичност - ефектът на АСР върху еластичните свойства на бетона и скоростта на ултразвуковия импулс (UPV) е много подобен на този върху якостта на опън при огъване;
- умора на бетона - АСР намалява устойчивостта на бетона против умора;
- якост на срязване - АСР намалява якостта на срязване на бетона;

- повишени опънни усилия в армировката и нарушено сцепление с бетона поради ефект подобен на своеобразно химическо предварително напъгане;

- водоуплътност - намалена водоуплътност на бетона;
- дълготрайност - напукването, намалените водоуплътност, якостни характеристики и носеща способност довеждат до компрометиране на корозионната устойчивост, функционалност и дълготрайност на конструкциите и съоръженията;
- визуално-естетически дефекти по повърхността на бетоните.

### III. Методи за превенция на алкало - силициева реакция. Защита и поправки на съществуващи конструкции

#### Превенция на АСР

Рискът от АСР се управлява чрез елиминирането на един или повече от изброените по-горе фактори, които я предизвикват. Конкретни препоръки за избягване на АСР са дадени в Concrete Society Технически Доклад TR30 „Алкало- силициева реакция – минимизиране на риска от повреда на бетона“, ASTM C294, ASTM STP 169, Building Research Establishment Digest 330, СД CEN/TR 16349:2012, Определяне на мерки за избягване на вредна алкало-силициева реакция (АСР) в бетон и др.

Неизползването на потенциални реакционно способни добавъчни материали е най-безопасният подход, тъй като влагата и алкалите могат да проникнат в бетона и да бъдат привнесени и от външен източник. За намаляване на риска от неблагоприятно въздействие следва да се избягват добавъчни материали реакционно способни с алкалните оксиди, съдържащи разтворим в алкална среда  $\text{SiO}_2$  като напр. опал, халцедон (като включвания в основната маса на скалата или като отделни зърна в добавъчния материал), пясъчници с опал-халцедонова или халцедон-кварцова спойка и туфогенни седиментни скали, вулканични скали: риолити, андезити, трахити, дацити, базалти, диабаз и преходни скали като андезито-базалти, трахиандзити, риодацити и др., както и техните туфи и туфити; глинести слюдени шисти, аргилити, филити, кристобалит, тридимит, зеолити съгласно БДС 14851:2015. Порести, напукани, изветрени или натрошени агрегати като цяло са по-реактивни от тези с по-плътна структура и заоблени повърхности, както е посочено в публикация на фирма Sika (2015). Трудността при избягването на реакционни добавъчни материали е, че някои агрегати показват признаци на АСР години след отливването на бетона. Поради това оценката на добавъчните материали за алкалореакционност е обичайна практика, особено при отговорни съоръжения, като изискванията за контрол на качеството са включени в спецификацията за бетона. Изпълняват се стандартни тестове за реакционна способност, минерало-петрографско изследване и се проучват данните за предишно използване на съответния източник на инертни материали заедно с предложени цимент. Често, поради логистични затруднения и икономически съображения, е нецелесъобразно да бъде избегнато напълно използването на чувствителни инертни материали.

Циментовият клинкер допринася в най-голяма степен за алкалната среда в повечето бетони. Смесените цименти допринасят за редуциране на алкалното съдържание. Пуцоланови добавки като летяща пепел, гранулирана доменна шлака или микросилициев прах реагират и консумират наличните хидроксилни (алкални) йони по време на процеса на хидратация. При установена реакционна способност на добавъчния материал може да се използва ситно смляна минерална добавка от активен  $\text{SiO}_2$ , която реагира с  $\text{R}_2\text{O}$  в ранния период, когато циментният камък е все още пластичен, а и образуванията са с по-малки размери и не предизвикват напукване. Плътният и непроницаем бетон забавя разпространението на свободните алкали и миграцията на вода в бетонната структура. При използването на активни минерални добавки трябва да се вземе предвид химическия им състав и най-вече съдържанието им на  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Намаляването на количеството на алкалите в бетона може да се постигне и посредством използването на цименти с ограничено съдържание на алкални оксиди или редуциране на количеството на цимента, като с помощта на пластифициращи и суперпластифициращи добавки се запазят водоциментното отношение и обработваемостта. Добавянето на добавки на основа  $\text{LiNO}_3$  в бетоновата смес също допринася за нейната устойчивост на АСР. Може да се използват и въздуховъвличащи добавки, които да създадат определено количество празнини в бетона, които да поемат разширението от АСР. Където е оправдано се прилага хидроизолиране на новопостроените съоръжения, което ги защитава от влага от околната среда.

#### Методи за поправка и защита на изградени съоръжения

Алкало-силициевата реакция е необратима. При вече изградени съоръжения, показващи признаци на АСР на първо място е уместно да се обследва конструкцията с цел да се оцени т. нар. остатъчен потенциал за разширение. За целта се вземат проби (изваждат се ядки) от бетона за лабораторни химически и механични тестове. В допълнение се прави оглед, измервания и обследване (ултразвук, склерометър и др.) на конструкцията, за да се установи нейното състояние и да се подберат най-подходящите мероприятия за поправка и защита.

Поправките се състоят главно от дейности по инжектиране на образувалите се пукнатини и прорязване на fugи с цел освобождаване на вътрешните напрежения в бетона или осигуряване срещу последващо разширяване.

Защитата на изградените съоръжения включва осигуряване на бетона чрез изграждане или подобряване на системата за дрениране и отводняване и изпълнение на хидроизолация на конструкцията.

### IV. Заключение

Накратко бе разгледан процесът по влошаване на качествата на бетона, вследствие на алкало-силициева реакция на добавъчните материали.

Алкало-силициевата реакция е един от важните механизми на корозирание и компрометиране на бетонните и стоманобетонните конструкции. Способността за алкало-



силициева реакция е включена в националните изисквания за деклариране на експлоатационни показатели на бетон, изготвен в заводски условия, както и на добавъчни и скални материали и други строителни продукти с подобно предназначение.

АСР обикновено присъства в експертизи за оценка на състоянието и при обосновка на остатъчния ресурс на отговорни съоръжения. Редовните огледи, обследвания и мониторинг на изградените бетонни и стоманобетонни съоръжения са от съществено значение за откриване и предотвратяване на негативните последици от алкало-силициевата реакция. Тези мерки спомагат да се гарантира дълготрайността и конструктивната надеждност на съоръженията и техните елементи.

## Литература

- Борисов, Б (2012) „Експлоатационен срок на подземни стоманобетонни елементи и облицовки“, - списание „Минно дело и геология“, бр. 8-9, стр. 61-68;
- Борисов Б., Балев В., Павлов П., (2023) „Принципни положения при съвременния подход за осигуряване експлоатационния срок на подземни стоманобетонни съоръжения“, Сборник с доклади от Научно-техническа конференция с международно участие, посветена на 25-та годишнина на Софийското метро „Иновативни архитектурни, конструктивни и технически решения при строителството на метрополитени“ 26-27 януари 2023 г. гр. София, ISSN 978-619-90939-9-3, стр. 49-59;
- Борисов Б., Павлов П., (2024) „Корозия на подземни стоманобетонни съоръжения – методи за защита и превенция“ – Сборник с доклади от Девета национална научно-техническа конференция с международно участие „Технологии и практики при подземен добив и минно строителство“ 7–10.10.2024, гр. Девин – приет за публикуване;
- Защита на строителните конструкции от корозия, норми и правила за проектиране, Утвърдени със заповед № 1940 от 27.VI.1980 г. на МССМ и № 335 от 24.VI.1980 г. на КАБ, [http://kab-sofia.bg/images/stories/normi/3-v-3\\_korozia.pdf](http://kab-sofia.bg/images/stories/normi/3-v-3_korozia.pdf);
- Симеонов Й. и др., (1991) Строителни Материали, изд. „Техника“, София;
- Антикорозионни покрития. Решения на Sika за ремонт на структури, страдащи от алкало-силициева реакция, Sika България, (2015) <https://izolacii.eu/resheniya-na-sika-za-remont-na-strukturi-stradashti-ot-alkalo-silitsieva-reaktsiya/>;
- БДС 14851:2015, Добавъчни материали за бетон. Методи за определяне на алкалореакционна способност;
- Albinski S. An., Concrete cancer: characterization of Alkali Silica Reaction early stage products by electron microscopy, Faculté des sciences et techniques de l'ingénieur Laboratoire des matériaux de construction, Programme doctoral en science et génie des matériaux, 2022;
- Classification of alkali-silica reaction damage using acoustic emission: A proof-of-concept study, Construction and Building Materials, Volume 95, 1 October 2015, Pages 406-413;
- Diamond S., (1992) 'Alkali aggregate reactions in concrete. an annotated bibliography 1939-1991';
- Stanton T. E., (1940) 'A study of alkali-aggregate reactivity', Proc. Amer. Soc. Civ. Eng, vol. 66, pp. 1781–1792;
- Stanton T. E. (1940), 'Influence of cement and aggregate on concrete expansion', Engineering News-Record;
- Marwa Abdelrahman et al., (2016) "Structural Effects of ASR on Concrete Structures ". FPrimeC Solutions. Pages 10-28;
- Merz C., Hunkeler F., and Griesser, A. (2006) 'Schaden durch Alkali-Aggregat-Reaktion an Betonbauten in der Schweiz';

# SPATIAL AND TEMPORAL DISTRIBUTION OF FINE PARTICULATE MATTER AND ITS CORRELATION WITH METEOROLOGICAL PARAMETERS IN THE ATMOSPHERE IN THE AREA OF A THERMAL POWER PLANT

*Maya Vatzkitcheva, Plamen Savov, Nikolay Kolev, Kalinka Velichkova, Dimitar Dimitrov*

*University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia*

*Corresponding author: mayavack@gmail.com*

**ABSTRACT.** Under certain critical meteorological conditions, emissions of harmful substances from production gas and dust flows, released into the atmospheric air in an organised manner, can lead to higher concentrations in the ground atmospheric layer and are a major factor determining air quality. One of the main and powerful sources of atmospheric air pollution is the burning of solid fuels in an industrial installation - a coal-fired thermal power plant. The paper presents the results of the spatial and temporal distribution of fine particulate matter (PM) in the atmosphere in the area of a coal-fired thermal power station. In parallel, the main meteorological parameters were measured: temperature, relative humidity, wind direction and speed. Based on the correlation dependences between the concentration of particulate matter in the atmosphere and the meteorological parameters, analyses were made for the degree of dependence between these parameters and the type and intensity of the dispersion of pollutants. The aim is to obtain information on how different meteorological situations affect the aerosol concentration levels around the source and which of the situations pose the most serious risk of reaching health hazardous concentrations.

**Key words:** particulate matter, atmospheric boundary layer, aerosol dispersion, industrial installations, meteorological parameters.

## ВРЕМЕВО РАЗПРЕДЕЛЕНИЕ НА ФИНИ ПРАХОВИ ЧАСТИЦИ И КОРЕЛАЦИЯТА ИМ С МЕТЕОРОЛОГИЧНИТЕ ПАРАМЕТРИ В АТМОСФЕРАТА В РАЙОНА ОКОЛО ТЕЦ

*Майя Вацкичева, Пламен Савов, Николай Колев, Калинка Величкова, Димитър Димитров*  
*Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София*

**РЕЗЮМЕ.** Емисиите на вредни вещества от производствени газово-прахови потоци, изпускани организирано в атмосферния въздух, при определени критични метеорологични условия може да доведе до по-високи концентрации в приземния атмосферен слой и са основен фактор, определящ качеството на въздуха. Един от основните и мощни източници на замърсяване на атмосферния въздух е изгарянето на твърди горива в промишлена инсталация - въглищна ТЕЦ. В работата са представени резултати от пространственото и времево разпределение на фини прахови частици (ФПЧ) в атмосферата в района на ТЕЦ на въглища. Паралелно са измервани и основните метеорологични параметри – температура, относителна влажност, посока и скорост на вятъра. На базата на направените корелационни зависимости между концентрацията на фините прахови частици в атмосферата и метеорологичните параметри, са направени анализи за степента на зависимост между тези параметри и вида и интензитета на дисперсията на замърсителите. Целта е да се получи информация за това как различните метеорологични ситуации влияят върху нивата на концентрация на аерозола около източника и кои от ситуацията създават най-сериозен риск от достигане на опасни за здравето концентрации.

**Ключови думи:** фини прахови частици, атмосферен граничен слой, дисперсия на аерозол, промишлени инсталации, метеорологични параметри.

## Въведение

Електрическата енергия играе ключова роля в промишлеността и селското стопанство за растежа и развитието на всяка държава, подобрява икономическото развитие и качеството на живот. Въглищата обикновено се използват като гориво за производство на електроенергия. По отношение както на цената, така и на енергийната сигурност по света, особено в азиатските страни, това е много ефективно и икономично. Изгарянето им, обаче, освобождава сериозни замърсители на въздуха като: серен диоксид (SO<sub>2</sub>), азотен оксид (NO<sub>x</sub>), въглероден оксид (CO), прахови частици (PM), въглероден диоксид (CO<sub>2</sub>), озон (O<sub>3</sub>), живак (Hg), олово (Pb) и т.н., които предизвикват неблагоприятно въздействие върху околната среда и човешко здраве. Те са киселини по природа вещества и газове и така екосистемата постепенно се унищожава, поради увеличаване на концентрацията им. Газообразните емисии като NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> се превръщат в частици в присъствието на влажност във въздуха. Тези частици са основните замърсители на въздуха. Проучвания от Център за наука и околна среда, Индия, 2015 г., показва че топлоелектрическите централи на въглища (ТЕЦ) са отговорни за 60% PM емисии, 50% SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> емисии и

повече от 80% от емисиите на живак сред всички индустрии (K. Guttikunda et al., 2014; Tuhin Bera et al., 2021). Правителство на Индия в икономическото проучване през 2016–2017 г. показва че броят на смъртните случаи, свързани със замърсяването от въглищни електроцентрали, е около 115000 годишно, а отрицателно въздействие върху дихателната система, сърдечно-съдови заболявания, неврологични ефекти и др. е много сериозен здравен проблем за населението. Следователно е наложително да се минимизират и контролират емисиите на замърсители от въглищни ТЕЦ чрез някои подходящи екологични управления (Li, D. et al., 2012; Lad, R. K. et al. 2008; ; Zeng, M et al. 2017; Tang, L. et al. 2019; Xue, W et al. 2016).

ТЕЦ "Марица Изток 2" ЕАД е най-голямата реновирана топлоелектрическа централа в България. Предметът на дейност е производство на електрическа енергия. Тя е една от четирите електроцентрали в комплекс „Марица Изток“, който е разположен в югоизточната част на страната. Работи с местни лигнитни въглища, добивани в рудниците на „Мини Марица-изток“ ЕАД. ТЕЦ "Марица Изток 2" ЕАД има осем енергийни блока с изградени сероочистващи инсталации (СОИ) с ефективност над 94%. Инсталираната обща мощност достига 1620 MW.

С цел осигуряване спазването на нормите за всички основни показатели за качество на атмосферния въздух сероочистващите инсталации работят по т.нар. „мокър варовиков метод“, като основен реагент за процеса се използва варовик. Степента на почистване на SO<sub>2</sub> от димните газове е минимум 94 %. (М. Дончева-Бонева, 2009; М. Николова и др., 2010). Крайният продукт гипс се депонира заедно със сгуропепелината от котлите в сгуроотвала на централата.

В тази работа са представени и анализирани експериментални резултати, получени при измерване на концентрацията на фини прахови частици в района на ТЕЦ "Марица Изток 2". Направен е анализ за влиянието на основните метеорологични параметри (температура, влажност, посока и скорост на вятъра) върху вида на дисперсия на аерозола в района около централата. Определени са и са анализирани корелационните зависимости между метеорологичните параметри и концентрацията на фините прахови частици.

## Експеримент

Измерванията са проведени на 21.10.2023 г. в околностите на ТЕЦ "Марица Изток 2". Източниците на замърсяване в района биха могли да са два – комините на предприятието и междуселският път. Пътят обслужва предимно ТЕЦ-а и е ненатоварен. Трафикът възлиза на не повече от 20-30 коли/камиони на час. По тази причина, както и предвид преобладаващата посока на вятъра, предположихме, че като основен замърсител ще се яви близкият комин на ТЕЦ-а (фиг. 1). Той представлява точков източник на фини прахови частици (ФПЧ).



Фиг. 1. ТЕЦ „Марица Изток 2“ – факелът на десния комин е насочен към точките на измерване

Спрямо факела на комина точките на определяне на концентрациите на ФПЧ са разположени напречно - точки от 1, 2, 3 и 4 на фиг. 2, и надлъжно - точки 5, 2, 8, и 9. От 9:30 до 10:30 часа са проведени измерванията по напречната ос, от 17:20 до 18:00 часа – отново по напречната, а от 18:20 до 19 ч. по надлъжната ос. Средното отстояние от източника сутринта е 1,8 км. Следобед най-близко разположената т.5 е на 1,5 км, а най-отдалечената т.9 е на 2,5 км, както може да се види и от мащаба на картата на фиг. 2.

Числената и масовата концентрации на ФПЧ са измерени с преносим лазерен брояч на частици BQ20 – Trotec. Той е компактен измервател на качеството на въздуха - измерва прахово замърсяване, температура и относителна влажност на въздуха. Праховите му

измерванията се осъществяват в два канала: канал 1 (0 – 2,5 μm) и канал 2 (2,5 - 10 μm), в текста за краткост са означени като PM<sub>2,5</sub> и PM<sub>10</sub>. Диапазонът на измерване за PM 2.5: 0 ~ 2000 g/m<sup>3</sup>, а на PM 10: 0 ~ 2000 g/m<sup>3</sup>, диапазонът за температура е 0 ~ 50°C и за относителната влажност: 0 –



Фиг. 2. Карта на района с измервателните точки

100 % RH. Метеорологичните условия са регистрирани чрез многофункционална метеорологична станция. Чрез анемометър се определя скоростта на вятъра, а външната температура и относителна влажност на въздуха - чрез термохигрометър. Има възможност за измерване на количество на валежи (валежометър) и на посока на вятъра. За целите на експеримента температурата е измерена в градуси по Целзий, относителна влажност в %RH, атмосферно налягане в hPa, посока на вятъра и скорост съответно в deg и m/s.

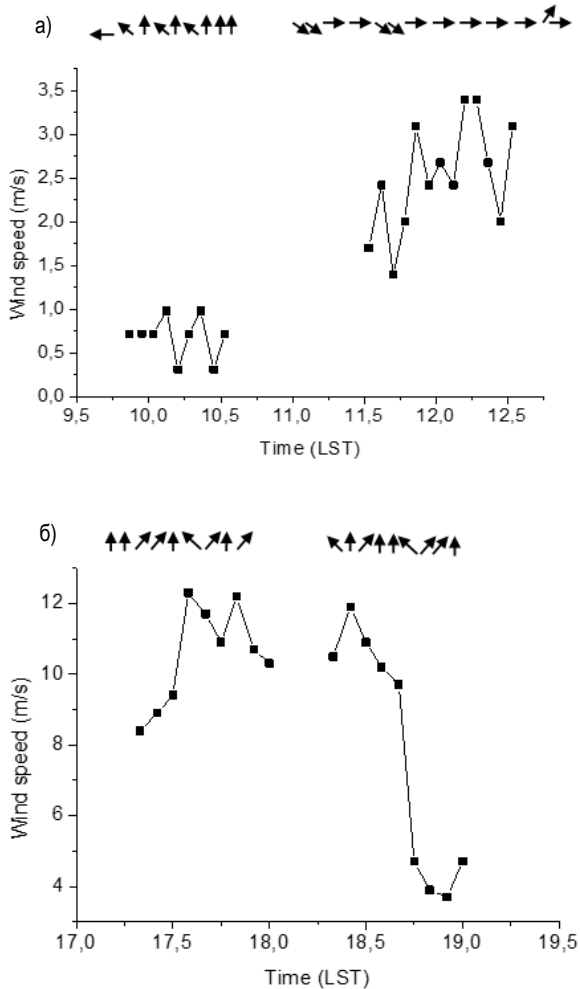
## Резултати и дискусия

**Метеорологична обстановка.** На фиг. 3 а) са представени данни за посоката и скоростта на вятъра на 21.10.2023 г. В сутрешните часове в интервала от 10:00 до 10:30 часа посоката на вятъра е юг-югоизток, като след 11:30 часа тя става основно западна. Скоростта е сравнително ниска, като около обяд достига 2 – 3 m/s.

В следобедните часове в интервала 17:00 – 19:00 часа посоката на вятъра е преобладаващо южна. За разлика от сутрешните часове, през следобедните скоростта на

вятъра е значителна, като около 18:00 часа се достигат стойности от около 12 m/s. След залеза на слънцето скоростта рязко спада под 4 m/s (фиг. 3 б)).

На следващата фиг. 4 е представена еволюцията на температурата през деня на експеримента. В сутрешните часове тя е в диапазона 24 – 27° C, а след обяд спада от 24°С около 18:00 часа до 19°С в 19:00 часа.

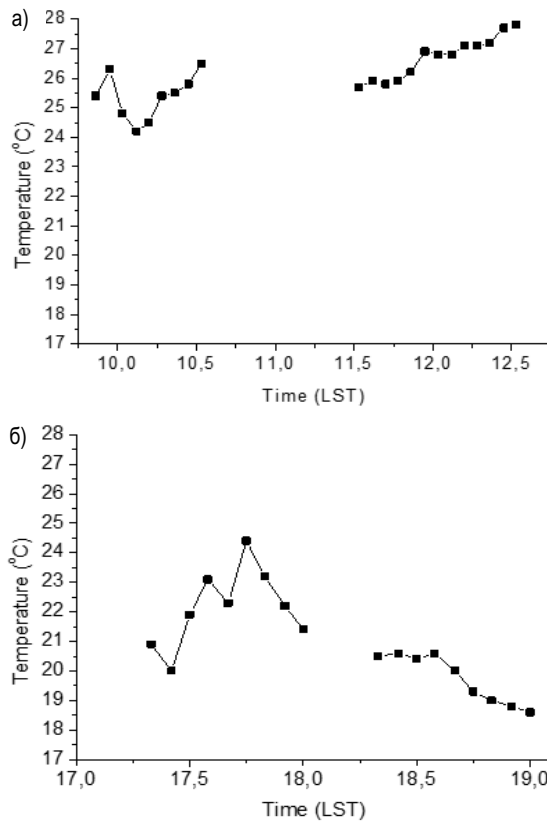


Фиг. 3. Скорост и посока на вятъра в сутрешните часове (а) и следобед (б)

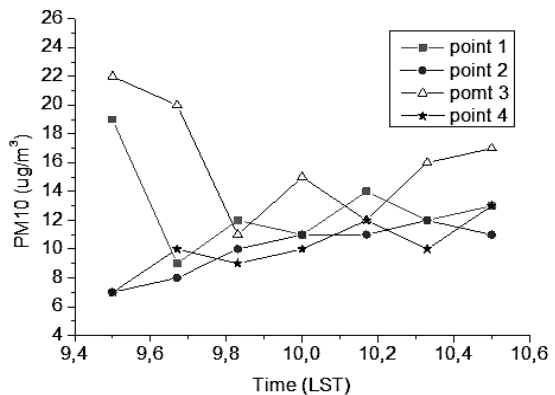
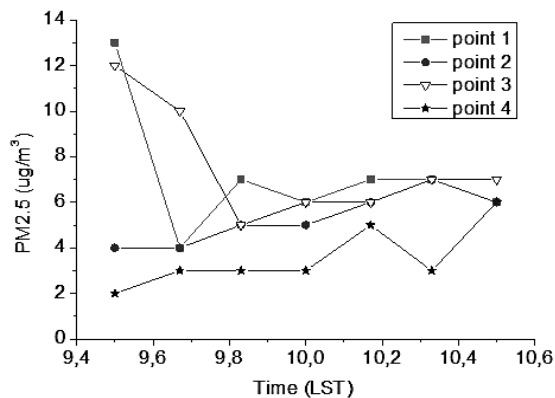
**Дневна вариация на числената и масова концентрация на PM<sub>2,5</sub> и PM<sub>10</sub>.** Многобройните изследвания на еволюцията на аерозолната концентрация в атмосферата показват наличие на определена специфична периодичност – дневна, нощна, сезонна и годишна (Yan S., 2016; Yang G., 2017). В тази работа се разглежда и дискутира дневната еволюция на аерозолната концентрация.

По време на експерименталната кампания бяха измерени вариациите в числената и масовата концентрации на фините прахови частици с диаметри 2,5 и 10 микрометра (PM<sub>2,5</sub> и PM<sub>10</sub>) в осем пространствени точки разположени около централата (фиг. 2).

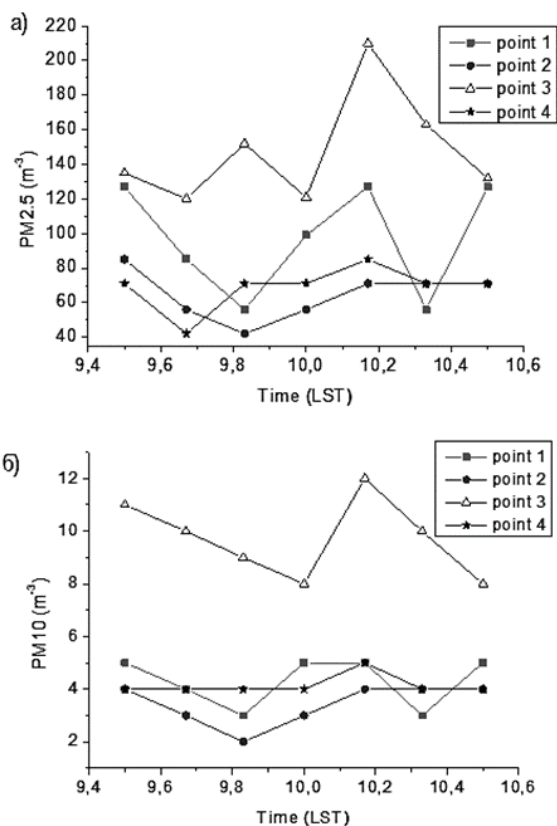
На фиг. 5 е представена еволюцията на масовата концентрация на PM<sub>2,5</sub> и PM<sub>10</sub> за точки от 1 до 4. И за двете фракции се забелязва слаб тренд на нарастване след 10 часа. При числената концентрация такъв тренд не се наблюдава (фиг. 6).



Фиг. 4. Температура в сутрешните часове (а) и следобед (б)



Фиг. 5. Масова концентрация на PM<sub>2,5</sub> (а) и PM<sub>10</sub> (б) за точки от 1 до 4 преди обяд



Фиг. 6. Числена концентрация на PM 2,5 (а) и PM10 (б) за точки от 1 до 4 преди обяд

В следобедните часове се наблюдава един минимум на масовата концентрация и за двете фракции около 17:45 часа, като най-висока концентрация е в точка 1 (фиг. 7).

На фиг. 8 са представени данни за промяната на масовата концентрация на фините прахови частици в интервала от около 18:15 до 19:00 часа за т.5, 2, 8, и 9. Наблюдава се един максимум около 18:40 часа, като най-високи стойности са измерени в точките 2 и 8.

#### Анализ на експерименталните данни

В часовете преди обяд се наблюдават сравнително високи стойности на температурата (около 26° C) и ниски стойности на вятъра. Това предполага наличието на сравнително интензивна термична турбулентност, която причинява и наблюдавания тренд на нарастване на концентрацията на фините прахови частици в атмосферата около централата.

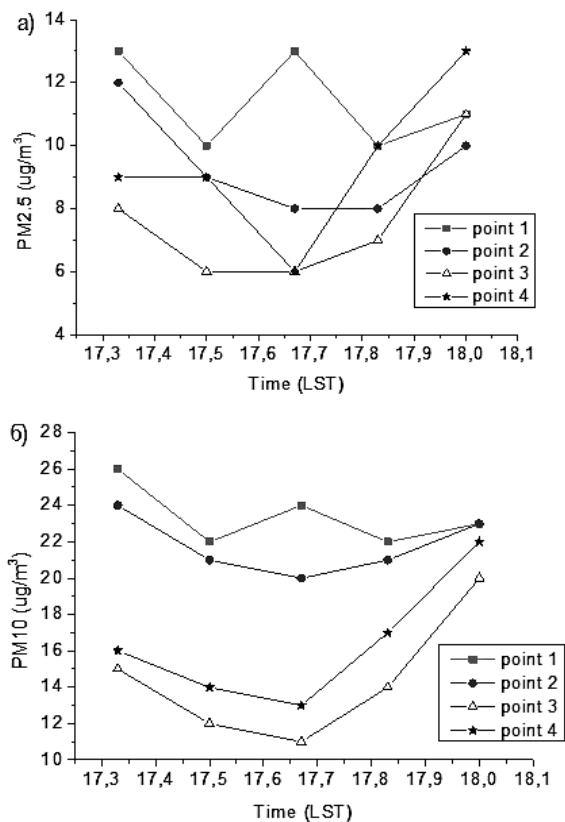
Наблюдаваното увеличение на масовата концентрация на фините прахови частици, преди обяд, при сравнително постоянен брой, свидетелства за емитиране в атмосферата на частици с по-голяма плътност и за двете компоненти.

В следобедните часове се наблюдава спадане на температурата с около 3 – 4 градуса. Скоростта на вятъра обаче достига 10 – 12 m/s. Това предполага преобладаване на динамичната компонента на турбулентността.

При сравнението на сутрешните измервания на масовата концентрация на PM средно за четирите експериментални точки (1 – 4) се вижда, че стойностите след обяд са около два пъти по-високи (средно около 10

µg/m³) от сутрешните (средно около 5 µg/m³). Причина за това е високата скорост на вятъра в следобедните часове, причиняваща ветрова ерозия от почвата и едновременно с това - интензивно размесване на частиците в атмосферата.

В следобедните часове посоката на вятъра е южна и аерозолния факул от комините на централата се носи по посока на точките 1 и 2 от трасето на измерване. Това обяснява наблюдаваните високи концентрации на частиците в тези две точки (фиг. 7).



Фиг. 7. Масова концентрация на PM 2,5 (а) и PM10 (б) за точки от 1 до 4 следобед

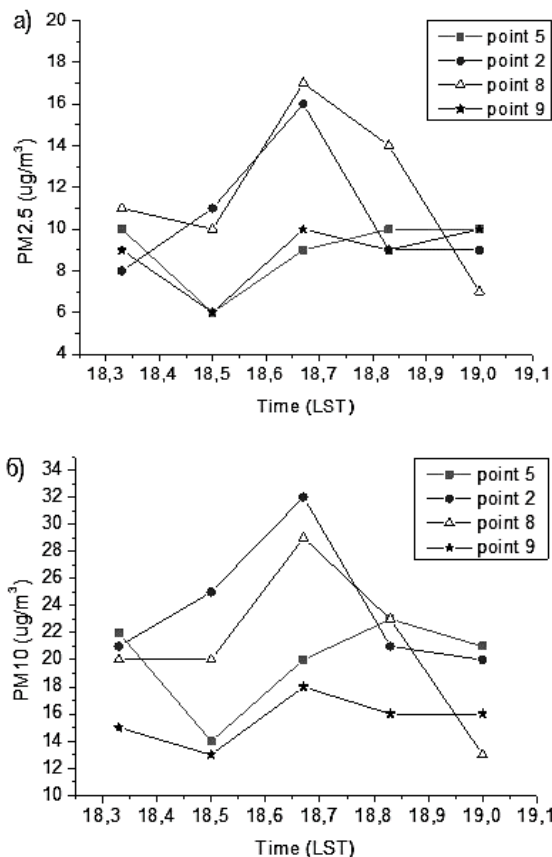
За трасето 5 – 9, точките са разположени по посока на разпространение на димния факул. Поради добре развитата турбулентност и височината на източниците, най-високи стойности се наблюдават в точките 2 и 8, а не в по-близката до източника точка 5 (фиг. 8).

**Корелация между метеорологичните параметри и концентрацията на частиците.** За да се установи степента на зависимост между метеорологичната обстановка и аерозолната концентрация, обикновено се използва метода на корелационния анализ (Naoran J., 2020).

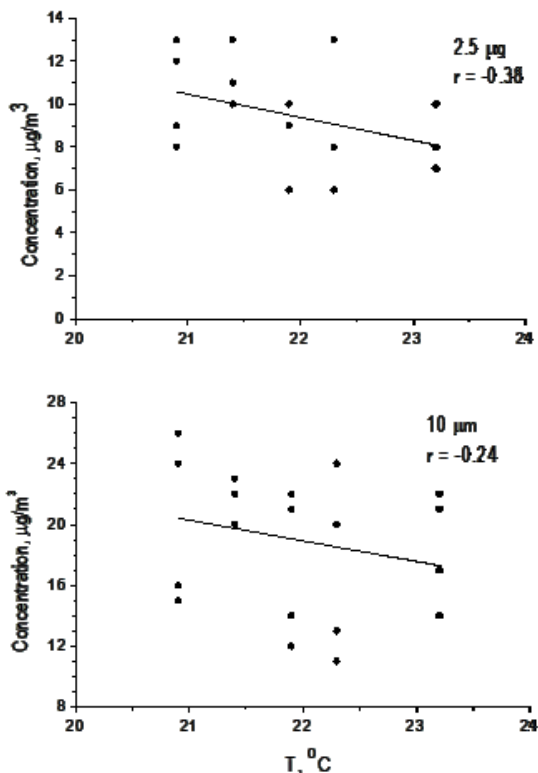
При пресмятането на коефициентите на корелация между температурата и вятъра и масовата концентрация на частиците са използвани експерименталните данни снети в направление 1-2-3-4 в следобедните часове на деня.

На следващите две фиг. 9 са представени резултатите от пресмятането на коефициента на корелация между масовата концентрация на фините прахови частици с диаметри 2,5 и 10 µm и стойностите на температурата за

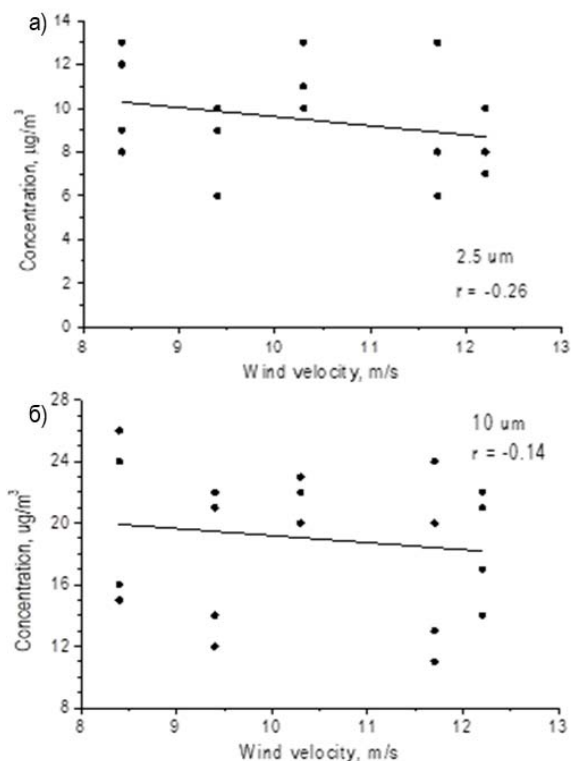
дадения период. От представените графики се вижда, че корелацията е средна по големина и с отрицателен знак.



Фиг. 8. Масова концентрация на PM 2,5 (а) и PM10 (б) за точки от 5, 2, 8 и 9 следобед



Фиг. 9. Корелационни зависимости концентрация-температура за PM 2,5 (а) и PM10 (б)



Фиг. 10. Корелационни зависимости концентрация-скорост на вятъра за PM 2,5 (а) и PM10 (б)

Отрицателния знак показва, че зависимостта масова концентрация – температура е обратнопропорционална, т.е. при нарастване на температурата, концентрацията намалява. Това се обяснява с факта, че при нарастване на температурата обикновено височината на слоя на смесване нараства и по този начин обемът, в който се разпространяват частиците, става по-голям и следователно това води до спадане на концентрацията с времето.

Корелацията между масовата концентрация и скоростта на вятъра е показана на фиг. 10. Вятърът е другият важен метеорологичен параметър, който генерира турбулентност в планетарния граничен слой. Тази турбулентност за разлика от термичната е с динамичен характер. Логично е и тук да се очакват отрицателни стойности за коефициентите на корелация, понеже с увеличаване на скоростта на вятъра нараства и разсейването на аерозола в атмосферата и следователно пада и неговата концентрация.

Интересно е да се отбележи, че корелационните зависимости на концентрациите и при температурата и при вятъра са по-силно изразени при малките частици 2,5 µm (фиг. 9 а, 10 а). Този ефект може да се обясни с по-малката маса и съответно по-малката инертност на частиците 2,5 µm.

### Заклучение

При анализа на резултатите от експерименталната кампания, свързана с изследване на процесите на дисперсия на фините прахови частици около точков източник (в случая ТЕЦ) може да се направят следните обобщаващи заключения:



- При тази мощност на централата (за есенния период от годината) стойностите и на масовата, и на количествената концентрация не надхвърлят пределно допустимите норми на замърсяване.

- Както е логично да се очаква, метеорологичната ситуация влияе съществено върху дисперсията на аерозола в атмосферата. С нарастване на температурата през деня се засилва термичната турбулентност, която заедно с динамичната – причинена от вятъра, водят до намаляване на концентрацията на фините прахови частици.

- Пресметнатите отрицателни стойности на корелационните коефициенти, за връзката между температурата, вятъра и концентрацията подкрепят горните изводи. Това означава, че с повишаване на температурата и/или скоростта на вятъра концентрацията и за двата вида частици намалява с времето.

При сравнението между големините на корелационните коефициенти за частиците с аеродинамичен диаметър 2,5 и 10  $\mu\text{m}$  показва, че в случая за степента на дисперсия на частиците в атмосферата по-силно влияние има по-скоро масата на съответната частица, отколкото аеродинамичният ѝ диаметър.

**Благодарности (Acknowledgements)** Настоящото изследване е проведено във връзка с изпълнението на:

Национална научна програма (ННП) „Опазване на околната среда и намаляване на риска от неблагоприятни явления и природни бедствия“, одобрена с Решение на МС № 577/17.08.2018 г. и финансирана от МОН (Споразумение № D01-27/06.02.2024).

Дог. ГПФ № 250, НИС-МГУ, Срок: III – XII.2024 г. „Пространствено и времево разпределение на фини прахови частици и корелацията им с метеорологичните параметри в атмосферата в района около ТЕЦ“. Ръководител: доц. д-р Н. Колев - катедра „Приложна геофизика“, научен колектив: доц. д-р Пламен Савов, доц. д-р Майя Вацкичева, гл. ас. д-р Калинка Величкова, гл. ас. д-р Димитър Димитров - катедра „Приложна геофизика“.

## Литература

Дончева-Бонева, М. (2009). Оценка качеството на атмосферния въздух в района на „Марица Изток“ *Forestry ideas*, 2/2009 (38)

Николова, М. (2010) Влияние на енергийния комплекс „Марица-изток“ върху производството на екологична земеделска продукция. *Сп. Диалог*, ИНИ, 11-5 133

Guttikunda, K., Puja Jawahar (2014) Atmospheric emissions and pollution from the coal-fired thermal power plants in India, *Atmospheric Environment*, Vol 92, pages 449-460, <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.04.057>

Haoran, J., Correlation between PM concentrations and meteorological conditions in Chengdu based on in-situ observations, *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 2020, 780(3):032038. doi: 10.1088/1757-899X/780/3/032038

Li, D., Guo, Y., Li, Y., Ding, P., Wang, Q., Cao, Z.. (2012). Air pollutant emissions from coal-fired power plants. *Open J. Air Pollut.* 1, 37–41. <http://dx.doi.org/10.4236/ojap.2012.12005>

Lad, R.K., Christian, R.A., Deshpande, A.W.,. A fuzzy MCDM framework for the environmental pollution potential of industries focusing on air pollution. *WIT Trans. Ecol. Environ.* Vol. 116, Aug 2008, <http://dx.doi.org/10.2495/AIR080621>

Tang, L.; Qu, J.B.; Mi, Z.F.; Bo, X.; Chang, X.Y.; Anadon, L.D.; Wang, S.Y.; Xue, X.D.; Li, S.B.; Wang, X.; et al. ( 2019). Substantial emission reductions from Chinese power plants after the introduction of ultra-low emissions standards. *Nat. Energy*, 4, 929–938

Tuhin Bera, Nirmal Kumar Mahapatra (2021). Ranking of thermal power plants focusing on air pollution: A Neutrosophic assessment, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 316, 128250, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128250>

Xue, W.; Xu, Y.; Wang, J.; Tang, X. ( 2016). Ambient air quality impact of emissions from thermal power industry. *China Environ. Sci.*, 36, 1281–1288

Yan S, Cao H, Chen Y, Wu C, Hong T, Fan H., Spatial and temporal characteristics of air quality and air pollutants in 2013 in Beijing. 2016 *Environ Sci Pollut Res Int.* Jul;23(14):13996-4007. doi: 10.1007/s11356-016-6518-3

Yang Qianqian, Qiangqiang Yuan, Tongwen Li, Huanfeng Shen, and Liangpei Zhang (2017) The Relationships between PM<sub>2.5</sub> and Meteorological Factors in China: Seasonal and Regional Variations *Int J Environ Res Public Health*, Dec; 14(12): 1510. doi: 10.3390/ijerph14121510

Zeng, M.; Zhang, P.; Yu, S.K.; Liu, H. (2017). Overall review of the overcapacity situation of China's thermal power industry: Status quo, policy analysis and suggestions. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 76, 768–774.



## APPLIED METHODS FOR ESTABLISHING RADON EXPOSURE IN UNDERGROUND SITES

**Blagovesta Vladkova, Dimitar Dimitrov, Nadezhda Kostadinova, Zahari Dinchev, Diana Makedonska,  
Alexander Krilchev**

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: blagovesta.vladkova@mgu.bg; ph001@mgu.bg;  
nadezhda.kostadinova@mgu.bg; dinchev@mgu.bg; diana.makedonska@mgu.bg; krilchev@mgu.bg  
Corresponding author: nadezhda.kostadinova@mgu.bg

**ABSTRACT:** Radon is a member of the uranium-radium decay family, it is distributed everywhere on Earth – in soils, rocks, minerals, water and air. Part of the radon emitted in the volume of earth mass migrates through air pores and crevices, reaches its surface and is released (exhaled) into the surface air. Radon is the dominant factor for the Earth's population exposure from the natural radioactive sources. Irradiation in buildings is considerably greater than outdoor irradiation because it penetrates freely into them as earth gases through defects in the outer tiling and small cracks in the foundations; the emanation of radon from water; exhalation from building materials with an increased content of  $^{226}\text{Ra}$ . The seepage of radon from the Earth's bowels can be observed in any closed ground spaces, tunnels, underground garages, basements. Radon entry into buildings depends on many factors, such as changes in atmospheric pressure, wind speed and precipitation, etc. Monitoring of radon concentration is relevant to human health if indoor radon concentration is high. The present study presents experimental measurements for radon content in four underground sites on the territory of the Sofia city, performed by means of two methods - numerical and analytical.

**Key words:** radon, thoron, exposure, safety, monitoring

### ПРИЛОЖНИ МЕТОДИ ЗА УСТАНОВЯВАНЕ НА ЕКСПОЗИЦИЯ НА РАДОН В ПОДЗЕМНИ ОБЕКТИ Благовеста Владкова, Димитър Димитров, Надежда Костадинова, Захари Динчев, Диана Македонска, Александър Крилчев

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

**РЕЗЮМЕ:** Радонът е член на уран-радиевото семейство на разпад, той е разпространен навсякъде по Земята – в почви, скали, минерали, води, въздух. Част от радона, отделен в обема земна маса, мигрира през въздушните пори и цепнатини, достига до нейната повърхност и се освобождава (ексхалира) в приземния атмосферен въздух. Радонът е доминиращ фактор при облъчване на населението на Земята от естествените радиоактивни източници. Облъчването в затворени помещения (сгради) е значително по-голямо от облъчването на открито. В тях той прониква чрез почвения газ, проникващ през дефекти във външната обвивка и пукнатини в основите на сградата; деemanацията на радон от вода; ексхалацията от строителни материали с повишено съдържание на  $^{226}\text{Ra}$ . Ексхалацията на радон от земните недра на практика може да се наблюдава във всякакви затворени приземни пространства, тунели, подземни гаражи, мазета. Навлизането на радон в сградите зависи от много фактори, като промени в атмосферното налягане, скоростта на вятъра и валежите и др. Мониторингът на концентрацията на радон е от значение за човешкото здраве, ако концентрацията на радон в помещенията е висока. В настоящото изследване са извършени експериментални измервания на нивата на радон в четири подземни обекти на територията на София, посредством два метода - цифров и аналитичен.

**Ключови думи:** радон, торон, експозиция, безопасност, мониторинг

### Introduction

Radon is a radioactive gas discovered by the French chemist Friedrich Dorn in 1900. As early as the 16<sup>th</sup> century, the Swiss physician and naturalist Paracelsus mentioned in his book a “mysterious Schneeberg miner's disease”. This is considered one of the oldest written pieces of evidence for the existence of the so-called “radon problem”, which led to the deaths of miners in the Schneeberg mines of Saxony and Jáchymov, Czechia. This fact is also described in the remarkable mining book of that era, “De Re Metalica”, by Agricola (Dimitrov, 2020).

After the discovery of radon, it was listed as a probable cause of lung cancer. This opinion was reinforced after 1924, when high levels of radon-222 were first measured in the Schneeberg mines. In 1951, Bale found the real cause of lung cancer in miners, namely internal exposure from short-lived decay products of radon, also called “daughter products” of radon – these are  $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Bi}$  and  $^{214}\text{Po}$ , (as  $^{214}\text{Po}$  is always in equilibrium with  $^{214}\text{Bi}$  and this fact is the reason why  $^{214}\text{Po}$  is not considered alone). The natural radiation background affects humans, and half of the effective dose received is due to radon.

Each year, around 1.8 million people worldwide develop lung cancer, making it one of the cancers with the worst prognosis – most patients die within a few years. According to the World Health Organisation (WHO) data from 2014, between 3% and 14% (about 230,000 people) of these cases are linked to radon. It is the second highest risk factor after smoking, and for non-smokers, it is the number one risk factor (WHO, 2009).

The only way to assess the levels of exposure due to various radon isotopes is through measurement. The majority of human exposure comes from radon decay products. Their measurement is directly related to the absorbed dose. Currently, measurements of radon alone can be conducted widely and over long durations, as recommended by WHO. Reference levels for buildings and workplaces in the European Union and in this country are given in terms of the annual average volumetric activities of  $^{222}\text{Rn}$ . For Bulgaria, the reference levels are  $300 \text{ Bq/m}^3$  for buildings and workplaces (Directive 2013/59/Euratom; Ordinance on Radiation Protection 2018).

### Variations of Radon

Radon is heavier than air and has no stable isotopes. It is an isotope from the uranium-radium series, originating from

uranium-238 ( $^{238}\text{U}$ ) (Mezovska V. 2018). In the natural environment, there are three radioactive isotopes of radon that are part of the natural radioactive series: actinon ( $^{219}\text{Rn}$ ) ( $T_{1/2} = 3.96\text{s}$ ) from the  $^{235}\text{U}$  series; thoron ( $^{220}\text{Rn}$ ) ( $T_{1/2} = 55.6\text{s}$ ) from the  $^{232}\text{Th}$  series; and radon ( $^{222}\text{Rn}$ ) ( $T_{1/2} = 3.82\text{d}$ ) from the  $^{238}\text{U}$  series (Dimitrov, 2020) (Fig. 1).

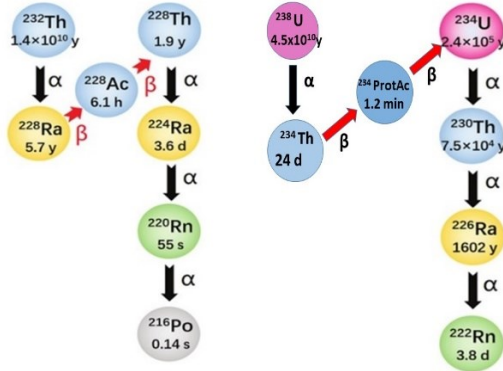


Fig. 1. Decay chains of the uranium-radium series

### Spreading and impact

Inhaled radon reaches the lungs and emits  $\alpha$ -particles, causing internal irradiation of the lungs. Radon inhaled into the body is further decomposed into hereditary nuclides, which then migrate from the lungs and oesophagus to the digestive organs along with body fluids, causing additional internal exposure.

The main sources of radon in closed spaces (buildings) (Fig. 2) are:

- Soil gas penetrating through the foundations of the building;

The emanation of radon from:

- Exhalation from building materials with an increased content of  $^{226}\text{Ra}$ ;
- Intake through ambient air from the environment. This source is secondary, but it can become essential if there are sites and facilities, such as mining sites, tunnels for highway pipes, boreholes, etc., nearby. (Fig. 3).

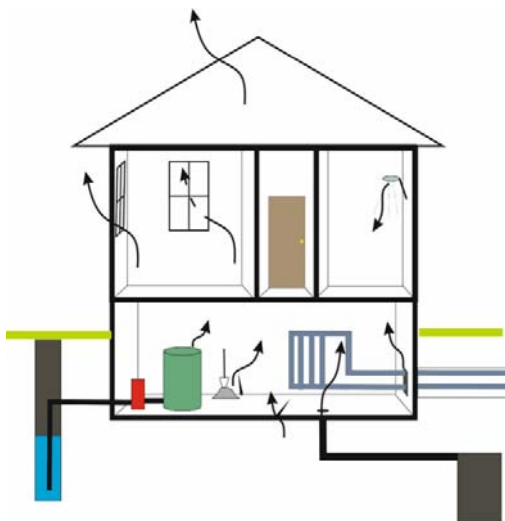


Fig. 2. The main sources of radon in closed spaces

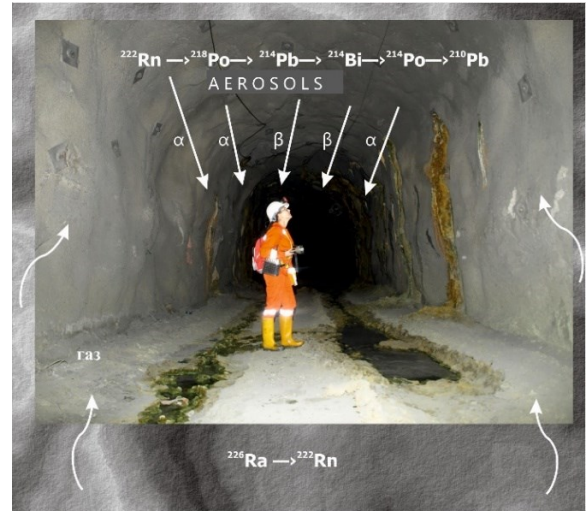


Fig. 3. Radon impact in underground mining sites

In underground mining sites, the concentration of radon may increase as a result of release from the rock massif during blasting operations or through groundwater (Shishkov and Stoycheva, 2021; Hristova et al., 2023).

### Methodology

#### Selected Radon Measurement Methods

For the present study, experimental measurements have been carried out using two methods for measuring radon content in underground objects - digital and analytical. The aim is to monitor the processes of accumulation of hazardous gases in confined spaces, and accordingly to prepare models to ensure the health and safety of the working and living environment.

The analytical method for cumulative measurements of radon ( $^{222}\text{Rn}$ ) and thoron ( $^{220}\text{Rn}$ ): consists of placing CD/DVD plates for measuring radon/thoron in underground spaces and mine workings (mining galleries, caves, etc.). This includes specifying the influence of underground conditions on the readings of these detectors and comparing them with other methods (Dimitrov and Pressyanov, 2018).

In 2011, the capacity of the CD/DVD method was expanded (Pressyanov et al. 2014, 2015, 2018) with the possibility of differential measurements of thoron  $^{220}\text{Rn}$ , using a development of the CD-disk method. This also makes it possible to clarify the contribution of thoron to the irradiation of miners and over ground personnel.

The principle of the CD/DVD method: combines the high absorbency of the polycarbonate material of the discs with its track properties (Fig.4 and Fig. 5).

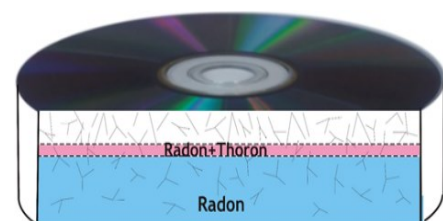


Fig. 4. The principle of the CD/DVD method for measuring radon and thoron. Signal formation.

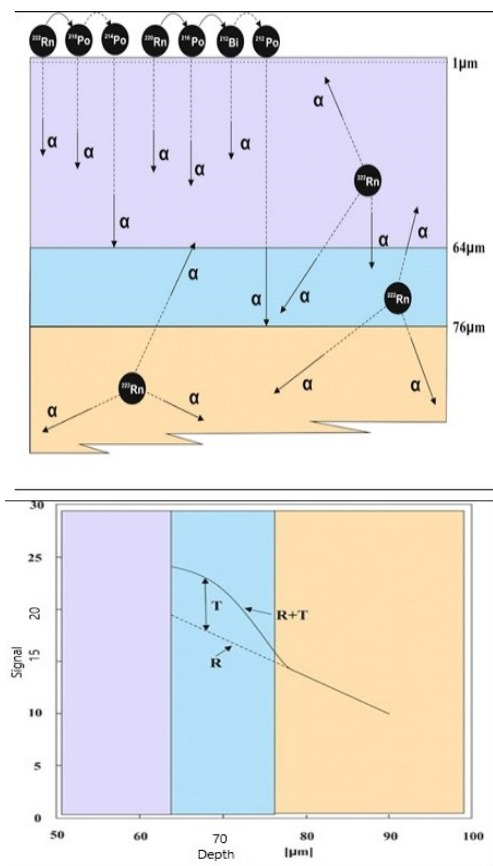


Fig. 5. Relationship between the density of the tracks at two depths below the surface of the polycarbonate and the time-integrated concentration of 222Rn (CF-calibration factor).

The calibration factor depends on the temperature at the time of irradiation. The temperature influence can be reported, incl. If it is not known, a posteriori correction can be applied. Other factors (pressure, dust, smoke, blast waves) do not affect the CD/DVD method. The CD/DVD method is sensitive and accurate enough to measure 222Rn and 220Rn in underground spaces and mines.

The digital method was applied using the *Radon Scout PLUS* radiometer (Fig. 6; Table 1), which carried out continuous monitoring of the concentration (volume activity) of radon in various underground sites (Gorbounov and Chen, 2019).



Fig. 6. The *Radon Scout PLUS* radiometer

Table 1. *Technical data of the Radon Scout PLUS radiometer*

Measurement range	0 – 10 MBq/m <sup>3</sup>
Increased sensitivity	1,8 impulse/min @ 1000 Bq/ m <sup>3</sup>
<b>Built-in sensors for:</b>	
- Relative humidity	(0 ... 100%)
- Temperature	(-20 ... 40°C)
- Pressure sensor	800 - 1200 mbar
2G Sensor	detecting movements/ hits
Measurement interval	1 hour or 3 hours can be adjusted
Measuring	Measuring chamber with HV collection and Si detector
Memory	672 Records
Display	3x16 Characters
Dimensions	175 x 135 x 55 mm
Weight	800g batteries incl.
Software included	Radon Vision

**Other measurement methods**

In addition to the methods chosen for this study, the most commonly used devices for determining the concentration of radon are: Alpha detectors, Activated carbon detectors, Electret ion chambers, Electronic sensors. Table 2 compares these methods.

Table 2. *Radon Measurement Methods*

Detector	Passive / Active	Uncertainty (%)	Duration of measurement	Price	Moisture resistance
Tracks	Passive	10-25	1-12 months	low	Depp. on application
Activated carbon	Passive	10-30	1-7 days	low	no
Electret ion chambers	Passive	8-15	5 days – 1 year	average	no
Electronic sensors	Active	~ 25	2 days – year (s)	average	no
Monitors for continuous measurements	Active	~ 10	2 days – year (s)	high	no
CD/DVD	Passive	10-20	year (s)	low	yes

**Selection of underground sites for measurement**

Four underground objects described in Table 3 were selected for the study. Figure 7 shows the location of the underground sites on the territory of the city of Sofia.

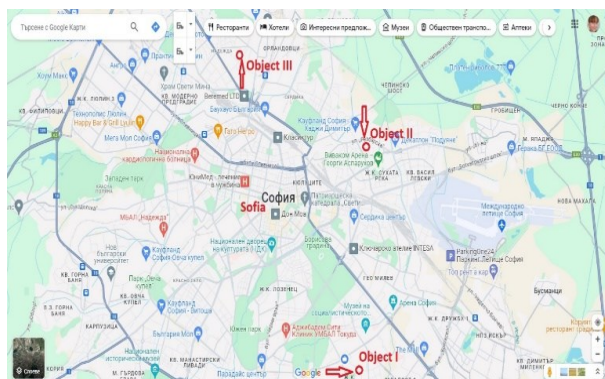


Fig. 7. Location of the sites on the territory of the city of Sofia.

Table 3. Location and characteristics of the sites

Object	Area	Type of location	Elevation	Period	Measurement duration
1	Sofia, Studentski grad	basement	-1,5 m	03.06. 23 - 13.11. 23	5 months – Analytical method; 7 days Radon Scout PLUS
2	Sofia, Hadzhi Dimitar res. area	Underground garage	-2 m, 20-23° C	03.06.2023 - 08.11.2023	5 months – Analytical method
3	Sofia, Nadezhda res. area	basement	- 2 m	03.06.2023 - 07.11.2023	5 months – Analytical method; 20 days Radon Scout PLUS
4	region Sofia	Underground mine	810, -760	03.07.2023 - 08.11.2023	4 months – Analytical method; 20 days Radon Scout PLUS

**OBJECT I – Sofia, Studentski grad –**  
Position 1 – Basement – elevation [– 1.5 m], Area 2.5 m<sup>2</sup>



Fig. 8. Locations of the disks and radiometer at object I – position 1

Position 2 – Basement corridor



Fig. 9. Location of a disc in object I – pos. 2

The measurement data in the basement site Studentski Grad are summarised in Table 4. Figure 10 shows the report obtained after measuring with a Radon Scout PLUS device.

Table 4: Reporting data from CD plates for object I:

CD / No	Ca, Bq/m <sup>3</sup>	δ Ca, Bq/m <sup>3</sup>	Object
7	45.95555	21.0%	basement
8	14.38977	19.7%	

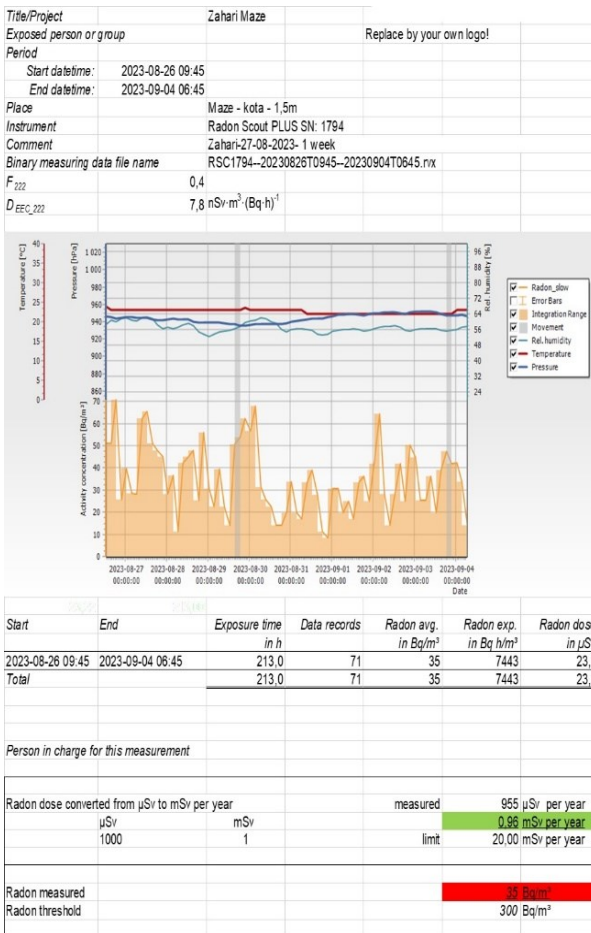


Fig. 10. Radon Scout PLUS measuring report for Object I

**OBJECT II /Position 1 – Sofia, Hadzhi Dimitar res. area,**  
Underground garage near the front door, elevation [– 2 m],  
Area 900m<sup>2</sup>; Analytical method of measurements



Fig. 11. Locations of the disks at object II – position 1

**OBJECT II /Position 2 - Unventilated corner in an underground garage (Fig. 12)**



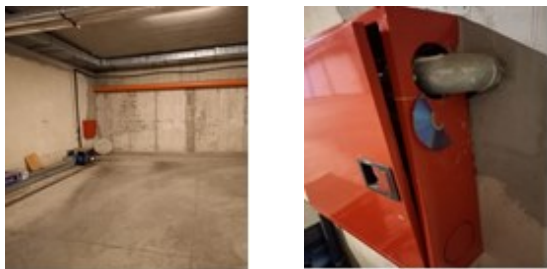


Fig. 12. Location of a disc in object II – position 2

Due to lack of access control at object II, no measurement with a *Radon Scout Plus* radiometer was carried out in it. The results obtained from the measurement by the analytical method are summarised in Table 5.

Table 5: Reporting data from CD plates for object II:

CD / No	Ca, Bq/m <sup>3</sup>	δ_Ca, Bq/m <sup>3</sup>	Object
3	94.72281	14.3%	Underground garage
4	123.3058	11.5%	

**OBJECT III – Sofia, Nadezhda res. area**  
Basement – elevation [- 2 m], area 3,2 m<sup>2</sup>  
Position 1 – Basement (Fig. 13).



Fig. 13. Locations of the disks and radiometer at object III – position 1



Fig. 14. Location of a disc in object III – position 2

In object III, both measurement methods were applied. The results obtained by the analytical method are presented in Table 6, and Figure 15 visualises the measurement report with *Radon Scout Plus*.

Table 6: Reporting data from CD plates for object III:

CD / No	Ca, Bq/m <sup>3</sup>	δ_Ca, Bq/m <sup>3</sup>	Object
5	68.72841	13.9%	Basement
6	56.72616	12.1%	

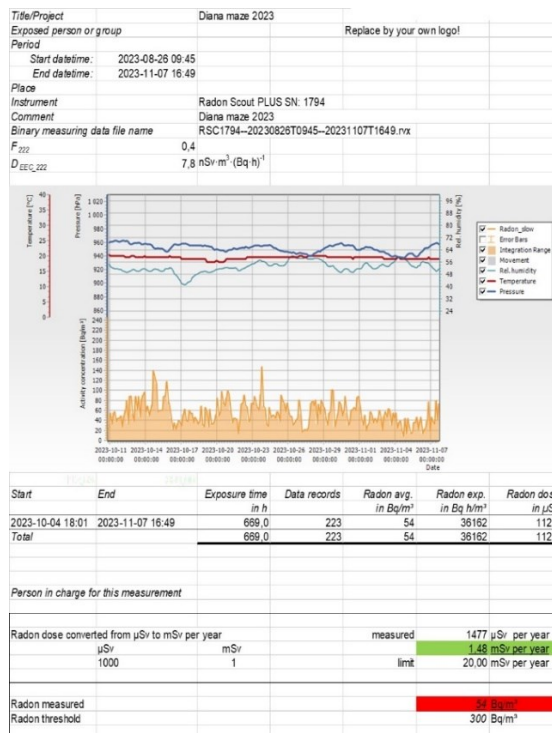


Fig. 15. Radon Scout PLUS measuring report for Object III

**OBJECT IV – Underground mine – elevation [- 810; - 760 m], Area 25 m<sup>2</sup>**



Fig. 16. Locations of the disks and radiometer at object IV - position 1

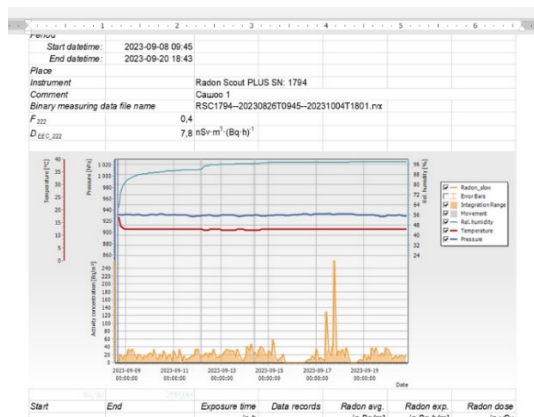


Fig. 17. Radon Scout PLUS measuring report for Object IV

Table 7: Reporting data from CD plates for object IV:

CD No	Ca, Bq/m <sup>3</sup>	δ_Ca, Bq/m <sup>3</sup>	Object
1	128.2615	13.2%	Underground mine
2	125.1702	18.5%	
9	<b>306.0969</b>	13.0%	
10	25.74966	18.0%	Underground mine
11	110	15.9%	
12	66.45911	15.1%	
13	69.12988	11.7%	
14	129.0014	15.9%	
15	72.13144	15.6%	
16	84	22.0%	
17	69.51581	15.7%	
18	28.56191	15.7%	
19	53.71669	9.8%	
20	56.97182	9.3%	
21	68.14635	16.1%	
22	113.9955	16.1%	
23	<b>245.0859</b>	18.6%	
24	121.0355	11.7%	
CD	96.79723	19.3%	

### Result and analysis

The emanation of radon into buildings depends on many climatic factors, such as changes in barometric pressure, soil and air humidity, wind speed and direction, precipitation, etc. As a consequence of these influences, in addition to daily fluctuations, indoor radon concentrations show significant seasonal variations. Therefore, long-term (from three months to one year, according to WHO requirements) radon measurements in homes, educational, working and public buildings are needed. Monitoring radon concentrations is important for human health. Prolonged exposure to environments with high radon concentrations can lead to a significant increase in the risk of developing lung cancer (Fig. 18).

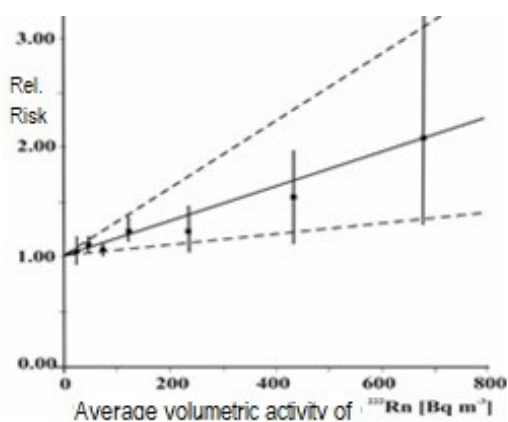


Fig. 18. Relative risk for lung cancer vs. the average residential radon concentration (WHO)

Specialised radon measurement is the only way to detect increased concentrations of radioactive gas in residential or public buildings. It is important to mention that during the winter months, there is an increase of about 4 times compared to the warmer ones. The concentration of radon is also influenced by the structure of the building and its ventilation. This also determines the complexity of forecasting.

It is important to note that within a day, variations in concentration are possible on the order of tens of times, depending on atmospheric changes. Therefore, the short-term measurement is not sufficiently representative.

Various underground objects have been selected for the study. The aim of the authors is to cover sites of different depth and purpose – residential buildings, industrial zones, and underground mines, where the expectations are for an increased radon emanation and different ventilation conditions. A continuous measurement was carried out using the passive method within 5 months. Using an active method (with an electronic device), the duration of the study is indicated for each object in Table 3. The challenge in these measurements was the low levels of radon and, as a consequence, the low density of the tracks. This low signal density results in a higher relative error (Table 8).

Table 8. Comparison of data reported by CD-plates for all objects

CD / No	Vol. Concentration: Ca, Bq/m <sup>3</sup>	Deviation: δ_Ca, Bq/m <sup>3</sup>	Object
1	128.2615	13.2%	Underground mine
2	125.1702	18.5%	
3	94.72281	14.3%	Underground garage
4	123.3058	11.5%	
5	68.72841	13.9%	Basement
6	56.72616	12.1%	
7	45.95555	21.0%	Basement
8	14.38977	19.7%	
9	306.0969	13.0%	Underground mine
10	25.74966	18.0%	
11	110	15.9%	
12	66.45911	15.1%	
13	69.12988	11.7%	
14	129.0014	15.9%	
15	72.13144	15.6%	
16	84	22.0%	
17	69.51581	15.7%	
18	28.56191	15.7%	
19	53.71669	9.8%	
20	56.97182	9.3%	
21	68.14635	16.1%	
22	113.9955	16.1%	
23	245.0859	18.6%	
24	121.0355	11.7%	
CD	96.79723	19.3%	

### Conclusion

In recent decades, the attention of the economy and society has been increasingly turned to the future, with a certain amount of anxiety caused by the consequences of our current actions for future generations. Undoubtedly, the development of technology in all aspects of human life brings with it many positives. Unfortunately, rapid leaps in development are accompanied by harm, leaving a lasting imprint on human

development and the environment. Improving the environment is also related to the creation of healthy and safe living and working conditions.

According to the Basic Standards of Radiation Protection included in National action plan (2018) and Strategy for Reducing the Risk of Radon Exposure (2018) recommended levels are accepted for the concentration of radon. If levels above the recommended ones are found, measures are taken to improve ventilation, reduce the entry of radon on the premises, etc.

According to the measured radon values in buildings, these are classified into three levels of risk – low, medium, and high. For each type, there are regulated specific measures that are evaluated at the design stage. In addition to the protection of new buildings, regulatory documents also describe in detail the technical requirements for radon protection in existing buildings.

Bulgaria has been present on the European map of natural radionuclides for several years. The purpose of the radon map is to outline the regions where high levels of radon are likely to be detected. The measurements carried out so far have covered some larger cities, cities with an increased incidence of lung cancer, as well as settlements influenced by the former uranium mining industry. The studies are not systematic and do not show the overall picture of exposure of the Bulgarian population.

**Acknowledgements:** *The authors express their gratitude to the University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski” for the funding under the scientific project MTF-188/2023. We want to express our gratitude to the colleagues from the Department of Physics at UMG and Sofia University “Kliment Ohridski” for their help in the execution of the analyses and methodology.*

## References

- Dimitrov D., Pressyanov D. (2018). The CD/DVD method as a tool for the health physics service and ventilation diagnostics in underground mines. *Radiat. Prot. Dosim.*, 181, 30-33.
- Dimitrov, D. (2020). Radon exposure of professional groups engaged in the extractive industry, PhD Thesis, Sofia.
- Directive 2013/59/Euratom - protection against ionising radiation of 5 December 2013 laying down basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionising radiation
- Gorbounov, Y., Chen, H. (2019). Technological Aspects and Applications of Large Power Switched Reluctance Motors in Mining, *Journal of Mining and Geological Sciences*, Vol. 62 – III, University of Mining and Geology „St. Ivan Rilski“, ISSN 2682-9525 (print) ISSN 2683-0027 (online), pp.82-91
- Hristova, T., Stoyanov, I., Evstatiev, B. (2023). Increasing the Functionality of Water Supply Systems for Bulgarian Conditions through Automation via IoT and Blockchain Technologies. *Eng. Proc.*, 41, 9. <https://doi.org/10.3390/engproc2023041009>
- Mezovska Viktoria, Radioactivity: Report, Reiche Zeche, Freiberg, Group 04, IN: 58466 30.5.2018
- National Action Plan for Reducing the Risk of Radon Exposure 2018-2027 Decision No. 55 of the Council of Ministers of 1 February 2018 (in Bulgarian)
- Ordinance on Radiation Protection in Activities with Sources of Ionising Radiation, SG. No. 16 of 20 February 2018 (in Bulgarian)
- Pressyanov, D., Dimitrov, D., Dimitrova, I. (2015). Energy-efficient reconstructions and indoor radon: the impact assessed by CDs/DVDs. *J. Envir. Radioact.* 143, 76-79.
- Pressyanov, D., Dimitrov, D., Dimitrova, I., Georgiev, S., Mitev, K. (2014). Novel approaches in radon and thoron dosimetry. *AIP Conf. Proc.* 1607, 24-33.
- Pressyanov, D., Dimitrov, D., Dimitrova, I. (2018). Passive radon monitors with part-time sensitivity to radon. *Radiat. Meas.* 118, 72–76.
- Shishkov, P., Stoycheva, N. (2021). Advanced Blasting Solutions with Fast-combusting Energetic Compositions for Extraction of Dimension Stones or Demolition, Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Drilling and Blasting Symposium, 25-26. Nov. 2021, Antalya, Turkey, pp.307-316, ISBN 978-605-01-1440-9.
- Strategy for Reducing the Risk of Radon Exposure 2018-2027 Council of Ministers of February 1, 2018 (in Bulgarian)
- World Health Organization, (2009). WHO handbook on indoor radon: a public health perspective. WHO press, Geneva, Switzerland. ISBN: 9789241547673



# UTILISATION OF GREEN WASTE FROM MINE OVERBURDEN THROUGH BIO-ELECTROCHEMICAL SYSTEMS

Rosen Ivanov

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

**ABSTRACT.** Proper management of overburden materials can reduce the environmental impact and increase the benefits of mining activities. It is important to consider the specific composition of the overburden and local needs when selecting the most appropriate recovery method. And while much of the overburden material can be used in construction, reclamation, cement production and more, the green waste problem has not been sufficiently solved. The present publication examines the possibilities of generating energy from the green waste from the overburden through bio-electrochemical systems. The possibilities of generating energy from grass, wood chips, and leaves have been investigated. The best results were achieved in grass utilisation, generating a power density of 107,58 mW/m<sup>2</sup>.

**Key words:** mine overburden, bio-electrochemical systems, solid-phase microbial fuel cells

## ОПОЛЗОТВОРЯВАНЕ НА ЗЕЛЕНИ ОТПАДЪЦИ ОТ ОТКРИВКАТА ЧРЕЗ БИО-ЕЛЕКТРОХИМИЧНИ СИСТЕМИ

Росен Иванов

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

**РЕЗЮМЕ.** Правилното управление на материалите от откритката могат да намалят въздействието върху околната среда и да увеличат ползите от минно-добивните дейности. Важно е да се обмисли специфичния състав на откритката и местните нужди, когато се избира най-подходящият метод за оползотворяване. И докато голяма част от материала на откритката може да бъде използван в строителството, за рекултивация, производство на цимент и други, проблемът със зелените отпадъци не е решен в достатъчна степен. В настоящата публикация са разгледани и изследвани възможностите за генериране на енергия от зелените отпадъци от разкритката чрез био-електрохимични системи. Изследвани са възможностите за генериране на енергия от трева, шредиран дървен материал и листа. При оползотворяването на трева бяха постигнати най-добри резултати, като се генерира плътност на мощността от 107,58 mW/m<sup>2</sup>.

**Ключови думи:** откритка, био-електрохимични системи, твърдофазни микробни горивни клетки

## Introduction

Underground mining of mineral ore requires the removal of an earth mass. In open pit mining, in particular, the volume of overburden generated during ore extraction can be very high. An overburden is a layer of soil, vegetation, and rock mass that must be removed to reach the ore being mined. Unlike the tailings, the overburden in most cases does not contain toxic components (Adibi et al., 2013).

The overburden material often finds direct application as sub-ballast in railway tracks, underlayment for asphalt pavements, aggregates (Mahamaya and Das, 2017), reclamation of terrains (Jambhulkar and Kumar, 2019), and others. Apart from those applications that have only focused on the direct use of mine overburden in various fields, overburden materials offer a high potential for conversion into a value-added product (Adibi et al., 2013).

In addition to soil and rock mass, the mine overburden also contains a large amount of vegetation. And unlike the mineral part of the overburden, the problem with the utilisation of green waste has not been solved to a sufficient extent (Spargo et al. 2016). Green waste is plant-based organic materials typically generated from lawn clippings, cut branches, fallen trees, leaves, plants, soil, and mulch. Green waste typically contains seeds, weeds and invasive plants that can enter and disrupt other ecosystems if disposed of inappropriately. These plants compete with native plants and degrade habitat quality, impacting biodiversity. Large piles of green waste can also suffocate small native plants and ground cover, affecting wildlife that rely on them for food and shelter. As green waste dries out, it creates a fire hazard, endangering neighbouring properties, infrastructure, and the environment. Green waste dumped into

rivers or stormwater ditches affects water quality. Decomposition of organic material consumes oxygen and releases nutrients, which can lead to aquatic eutrophication and disruption of aquatic ecosystems. Green waste disposed of in this way can clog sewers and contribute to localised flooding (Smith and Aber, 2018). Piles of green waste threaten the landscape and affect the values and amenities of natural areas. The material can also serve as a breeding ground for pests. The costs associated with the removal and disposal of green waste can be a considerable problem (Chiu et al., 2016).

Recently, renewable bioenergy has been seen as one of the ways to ease future fuel needs and overcome the global warming crisis. Microbial fuel cell-assisted bioelectricity generation through the degradation of organic matter has attracted considerable interest in both fundamental and applied research in recent years (Utomo et al., 2017).

A microbial fuel cell (MFC) is a device that uses bacteria to directly convert chemical energy stored in organic matter into electricity through electrochemical processes. MFCs can be fed with liquid-phase substrates, such as domestic wastewater and industrial wastewater. Solid-phase microbial fuel cells (SPMFCs) can be fuelled with solid-phase organic wastes such as sludge, sediments, and vegetation. (Song and Aber, 2018) In this configuration, the cathode is usually exposed to the ambient oxygen in the air or immersed in water, while the anode is placed under anaerobic conditions in the solid-phase organic matter at the bottom of the cell. SPMFCs can be used as power sources for long-term environmental monitoring devices due to their simple design and solid organic matter providing a long-term power source (Venkata and Chandrasekhar, 2011).

Biodegradable organic matter present in green waste can be efficiently used to generate energy in the form of bioelectricity

by the utilisation in solid phase microbial fuel cells. If properly designed, an SPMFC can facilitate the direct conversion of solid waste to energy and, therefore, make the process sustainable for waste management and recovery (Logrono et al., 2015).

In recent years, SPMFCs have emerged as a promising but challenging waste-to-energy technology, besides their treatment, gaining increasing importance due to their sustainable nature. This process offers the dual benefits of waste treatment and providing access to cheap and environmentally friendly energy (Mochamad et al., 2021).

This research aims to optimise the use of mine overburden waste by transforming it into value-added products and ensuring comprehensive and sustainable utilisation of green overburden waste.

## Materials and methods

### Construction of a solid-phase microbial fuel cell

The construction of the bio-electrochemical system for the experiment shown in Figure 1 is based on a single-chamber solid-phase microbial fuel cell (SPMFC). The solid-phase microbial fuel cell is a plastic container with a volume of 800 cm<sup>3</sup>. At the bottom of the vessel is a graphite electrode with an area of 30 cm<sup>2</sup>. The vessel was filled with organic green waste with a volume of 600 cm<sup>3</sup>. The cell was then filled with pure water and a second 30 cm<sup>2</sup> graphite electrode was placed in the surface layer of the water. Graphite electrodes were chosen due to their higher porosity and specific surface area, an advantage for the adherence and growth of electroactive microorganisms.

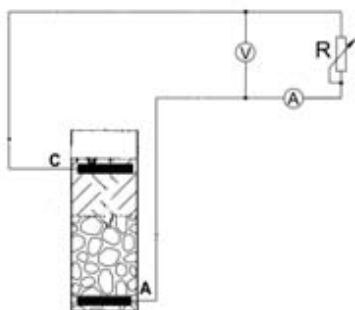


Fig. 1 Solid phase microbial fuel cell schematic diagram  
A – anode, C - cathode

### Solid-phase waste matter composition

Three identical solid-phase microbial fuel cells were made. The first one was filled with grass, the second was filled with leaves, and the third was filled with shredded wood (wood chips). 50 cm<sup>2</sup> of soil was added to each of the three cells. In this way, the cells were inoculated with an additional amount of electroactive microorganisms, naturally living in the soil (*Geobacter*, *Clostridium*, *Bacillus*, *Pseudomonas*, and others) (Bratkova et al., 2018).

### Measuring of cell electrical parameters

For the polarisation curve test, the anode and cathode in the SPMFC were connected to a varied resistance box MCP lab electronics BXR-04 ResistorBox, and the stable voltages were recorded under varying external resistances (Wang et al., 2013) sequentially from 11, 10, 9, 8, 7, 6, 5, 4, 3, 2, 1.5, 1.3, 1, 0.7, 0.5, 0.3 to 0.1 kΩ. Voltages produced from the SMFCs during the experiments were recorded at 60-min intervals using a *Vernier LabQuest Mini* and *Logger Lite* software.

Power was calculated according to  $P=IU$ . Current density and power density were calculated based on the anode area. The Ag/AgCl reference electrode was positioned near the cathode in order to measure the cathode potential. Anode redox potentials were approximated by subtracting the cell potential from cathode potentials (Song and Jiang, 2011).

## Results

The goal of this study is to integrate a microbial fuel cell with solid-phase plant organics using the composting process to generate energy. As seen in Figure 2, the voltage of all SPMFCs was low during the first 3 days of the experiment, but then increased rapidly. This may be due to the formation of an active biofilm on the surface of the electrodes (Venkata and Chandrasekhar, 2011).

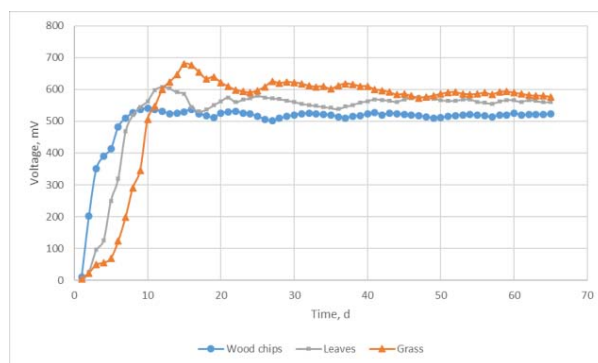


Fig. 2 Open-circuit voltage generation from SPMFCs containing green waste

SPMFCs reached their maximum voltage between day 8 and 14, remaining constant with slight fluctuations until day 65 of the experiment. The highest open-circuit voltage is generated by the SPMFC with grass. The cell reaches a maximum voltage on the 15th day (679 mV), then drops to 600 mV ± 24 and remains within these limits until the end of the experiment. The SPMFC with leaves generated a slightly lower open-circuit voltage and after the 20th day, it remained around 565 mV ± 6 until the end of the experiment. The lowest open-circuit voltage was generated by the SPMFC with wood chips. After stabilisation, the voltage during the experiment was in the range of 521 mV ± 10.

Figure 3 shows the polarisation curves of the three solid-phase microbial fuel cells.

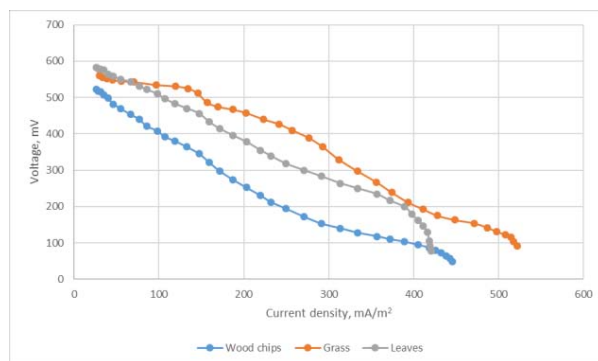


Fig. 3 Polarisation curves of SPMFCs containing green waste

The obtained graphs show close electrical parameters of SPMFCs with grass and of that with leaves. However, the solid-phase microbial fuel cell with grass shows the best results in terms of generated voltage and current density. A SPMFC with wood chips is characterised by the lowest value of the measured electrical parameters.

The power density curves of the SPMFCs were obtained on day 28 and are presented in Figure 4.

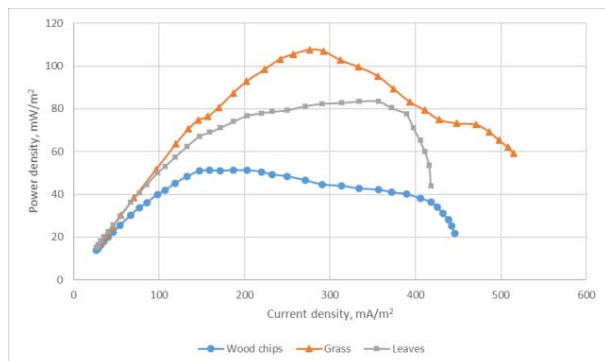


Fig. 4 Power density (data from polarisation curves) of SPMFCs containing green waste

The results in Figure 4 show that different organic substrates have different electrical characteristics in a solid-phase microbial fuel cell. This is most likely due to the different carbon/nitrogen ratio (Khudzari et al., 2016). The highest power density was achieved in the SPMFC with grass. A maximum power density of 107.58 mW/m<sup>2</sup> was obtained with this cell. A lower maximum power density was achieved for the SPMFC with leaves: – 83.51 mW/m<sup>2</sup>. In the SPMFC with wood chips, the lowest power density of 51.21 mW/m<sup>2</sup> was obtained.

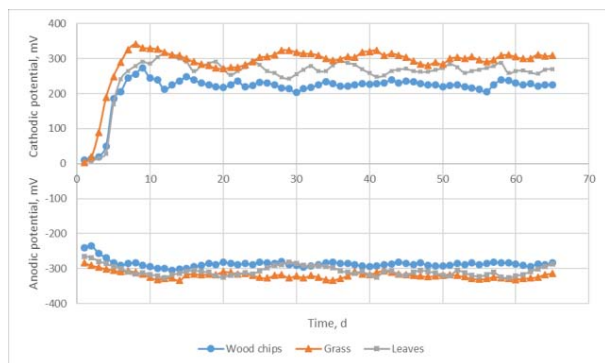


Fig. 5 Working potential of cathodes and anodes of SMFCs containing green waste

The results for the anodic and cathodic potentials relative to the Ag/AgCl reference electrode are presented in Figure 5. The cathodic potentials in the SPMFCs remained relatively constant throughout the experiment after cell stabilisation. The different patterns of cathode potentials of SPMFCs may be due to the rate of biofilm formation on cathodes, which resulted in different electrochemical characteristics of cathodes in SPMFCs. The SPMFC with grass maintained the highest cathodic potential of 300 mV ± 20 throughout the experiment. A slightly lower cathode potential was maintained in the leaf SPMFC. In this variant, the cathodic potential after stabilisation of the cell was in the range of 270 mV ± 23. The lowest cathode potential was measured in the SPMFC with wood chips. During the experiment, it moved in the range of 210 mV ± 14.

Anodic potentials in all SMFCs varied only slightly, ranging around from -280 to -330 mV, whereas the cathode potentials showed significant differences. The initial anodic potentials of the SPMFCs containing the green waste were negative (about -300 mV) and remained stable throughout the experiment.

## Conclusion

Materials from mine overburden can seriously disturb the balance in the ecosystems where they are deposited. The mineral part containing in overburden can be widely used, and a number of studies have been carried out on its utilisation and on the reduction of its harmful impact on the environment. This is not the case with vegetation that is removed from the terrain prior to the commencement of mining or construction activities. Improper disposal can lead to disruption of natural biodiversity and ecosystems and to pollution of environmental components.

The present study showed the possibility of utilising the green waste from the overburden by generating energy from it in solid-phase microbial fuel cells. All three investigated organic substrates – grass, leaves, and wood chips – showed that they can be a long-term source of energy. However, the SPMFC with grass showed the highest electrical performance in terms of generated voltage – 600 mV ± 24 and power density – 107.58 mW/m<sup>2</sup>. The lowest values of the electrical parameters were measured for the solid-phase microbial fuel cell with wood chips – a voltage of 521 mV ± 10 and a power density of 51.21 mW/m<sup>2</sup>. Between 8 and 14 days were required to reach the full potential of SPMFCs, due to processes related to biofilm formation of electroactive microorganisms on the electrodes and degradation of organic matter. After stabilising the SPMFCs, the cells maintained a constant voltage throughout the experiment.

The results obtained are an advance in research for the development of bioenergy sources. Further research is needed on various factors influencing the energy generated from green waste, such as the optimal carbon/nitrogen ratio, the use of cellulose-degrading enzymes, inoculation with electroactive organisms, and others (Wang et al., 2015). It is also necessary to conduct additional experiments related to the possibilities of storing and converting the generated energy.

## Acknowledgements

This work was supported financially by the CityLovers contest of the British Embassy Sofia.

## References

- Adibi, N., Osanloo, M., Rahmanpour, M., (2013) Adverse effects of coal mine waste dumps on the environment and their management, *Environmental Earth Science*, 70(4), 1581-1592, DOI: 10.1007/s12665-013-2243-0
- Bratkova, S., Ivanov, R., Gerginova, M., Peneva, N., Angelov, A., Alexieva, Z. (2018). Rhizosphere microflora of sediment plant microbial fuel cells, *Exploring microorganisms: Recent Advances in Applied Microbiology*, 40-43, ISBN:1627346236
- Chiu, H., Pai, T.Y., Liu, M.H., Chang, C.A., Lo, F.C., Chang, T.C., Lo, H.M., Chiang, C.F., Chao, K.P., Lo, W.Y., Lo, S.W., Chu, Y.L. (2016). Electricity production from municipal solid waste using microbial fuel cells, *Waste Management and Research*, 34(7), 619–629, <https://doi.org/10.1177/0734242X16649681>

- Jambhulkar, H., Kumar, M., (2019) Eco-restoration approach for mine spoil overburden dump through biotechnological route, *Environmental Monitoring and Assessment*, 191, 772, <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7873-6>
- Khudzari, J.M., Tartakovsky, B., Raghavan, G.S.V., (2016) Effect of C/N ratio and salinity on power generation in compost microbial fuel cells, *Waste Management*, 48, 135–142, <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.11.022>
- Logrono, W., Ramirez, G., Recalde, C., Echeverria, M., Cunachi, A., (2015), Bioelectricity generation from vegetables and fruits wastes by using single chamber microbial fuel cells with high Andean soils, *Energy Procedia* 75, 2009–2014, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.259>
- Mahamaya, M., Das, S.K., (2017) Characterization of mine overburden and fly ash as a stabilized pavement material, *Particulate Science and Technology*, 35(6), 660–666, <https://doi.org/10.1080/02726351.2016.1194344>
- Mochamad, B., Syafrudin, Agus, E., Syarif, H., Candra, P., Ayudya, L., Fadel, M., Bimastyaji, R., (2021) Waste valorization using solid-phase microbial fuel cells (SMFCs): Recent trends and status, *Journal of Environmental Management*, 277, 111417, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111417>
- Smith, M.M., Aber, J.D., (2018) Energy recovery from commercial-scale composting as a novel waste management strategy, *Applied Energy*, 211, 194–199, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.11.006>
- Song, T., Wang, D., Han, S., Wu, X., Zhou, C., (2014) Influence of biomass addition on electricity harvesting from solid phase microbial fuel cells, *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(2), 1056–1062, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.10.125>
- Spargo, A., Doley, D., (2016) Selective coal mine overburden treatment with topsoil and compost to optimise pasture or native vegetation establishment, *Journal of Environmental Management*, 182, 342–350, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.07.095>
- Song, T.S., Jiang, H.L., (2011) Effects of sediment pretreatment on the performance of sediment microbial fuel cells, *Bioresource Technology*, 102, 10465–10470, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.08.129>
- Utomo, H.D., Yu, L.S., Zhi Yi, D.C., Jun, O.J., 2017. Recycling solid waste and bioenergy generation in MFC dual-chamber model. *Energy Procedia*, 143, 424–429, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.12.706>
- Venkata, S., Chandrasekhar, K., (2011) Solid phase microbial fuel cell (SMFC) for harnessing bioelectricity from composite food waste fermentation: Influence of electrode assembly and buffering capacity, *Bioresource Technology*, 102(14), 7077–7085, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.04.039>
- Wang, C.T., Lee, Y.C., Liao, F.Y., 2015 Effect of composting parameters on the power performance of solid microbial fuel cells, *Sustainability* 7(9), 12634–12643, <https://doi.org/10.3390/su70912634>
- Wang, C.T., Liao, F.Y., Liu, K.S., 2013 Electrical analysis of compost solid phase microbial fuel cell, *International Journal of Hydrogen Energy* 38(25), 11124–11130, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.02.120>

## NEW TECHNOLOGY FOR AGRICULTURAL WASTE PYROLYSIS

Dimitar Kolev

Institute of Chemical Engineering, Bulgarian Academy of Sciences, Sofia 1113, Bulgaria, Acad. G.Bonchev str., bl.103 d.kolev@iche.bas.bg

**ABSTRACT.** The presence of large quantities of agricultural waste raises the issue of their utilisation. Direct incineration in specialised combustion plants is possible, but only in the vicinity of their reception. The relative weight of the straw is 300-400 kg/m<sup>3</sup> and transport is therefore very expensive. The proposed method makes it possible to pyrolyse the straw and process the charcoal into briquettes. 1 kg of charcoal is obtained from 2.5-3 kg of straw. The weight of the resulting briquettes is 700-900 kg/m<sup>3</sup>. Thus, they can be transported more cheaply and used as energy raw material.

**Key words:** gasification, energy efficiency, CO<sub>2</sub> reduction

### НОВА ТЕХНОЛОГИЯ ЗА ПИРОЛИЗА НА СЕЛСКОСТОПАНСКИ ОТПАДЪЦИ

Димитър Колев

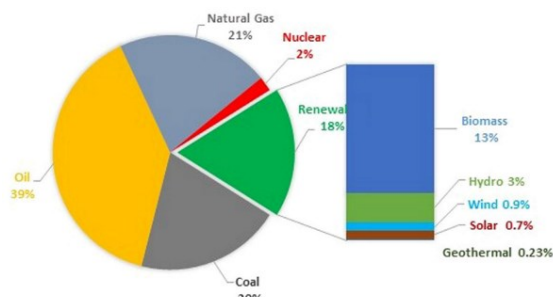
Институт по инженерна химия-БАН София 1113 ул. Акад Г. Бончев бл. 103

**РЕЗЮМЕ.** Наличието на големи количества селскостопански отпадъци повдига въпроси относно тяхното оползотворяване. Възможно е директно изгаряне в специализирани горивни инсталации, но само в близост до мястото на получаването им. Относителното тегло на сламата е 300-400 кг на м<sup>3</sup> и поради това транспортът е много скъп. Предложеният метод дава възможност за пиролизиране на сламата и за преработка на дървените въглища в брикети. От 2,5-3 кг слама се получава 1 кг дървени въглища. Теглото на получените брикети е 700-900 кг/м<sup>3</sup>. Това дава възможност за по-евтиното им транспортиране и използването им като енергийна суровина.

**Ключови думи:** газификация, енергийна ефективност, редукция на емисии от CO<sub>2</sub>

### Въведение

Политиката на Европейския съюз за по-пълно използване на възобновяемите източници е отразена в Директива 2023/2413 на Европейския парламент и на Съвета на Европа (Директива на европейския съюз, 2023/2413) за насърчаване използването на възобновяеми източници. Директивата определя целите, които Европа си поставя за намаляване на парниковите емисии с 55% до 2030 г. в сравнение с количествата въглероден диоксид, изхвърлени в атмосферата през 1990 г. Целта е дялът на енергията от възобновяеми източници да достигне 32% от brutното крайно потребление на енергия в Европейския съюз до 2030 г. На фиг. 1 по-долу е показано дяловото разпределение на използваната енергия през 2019 г. в световен мащаб (Global bioenergy statistics, 2019).



Фиг. 1. Дялове на различни източници на енергия в световен мащаб за 2019 г.

От фигурата се вижда, че само 18% от световното потребление се пада на възобновяемата енергия. Става ясно още, че енергията от биомаса е с решаващо място в целия микс. Тя се представя с 13%.

В Таблица 1 е представено разпределението на добива на енергия от различни източници по континенти за 2017г.

Таблица 1. Потребление на енергия в света за 2017 г.

	Total	Coal	Oil	Natural Gas	Nuclear	Renewables	Renewables (%)
Africa	24.5	1.58	7.44	2.08	0.04	13.4	54.5%
Americas	92.1	5.96	44.7	23.7	2.95	14.7	16.0%
Asia	170	58.4	58.7	24.3	1.53	27.1	15.9%
Europe	77.0	8.04	29.4	26.4	3.35	9.81	12.7%
Oceania	3.91	0.63	1.90	0.91	0.00	0.46	11.9%
World	370	75.2	143	77.9	7.93	65.7	17.7%

От таблицата се вижда, че през 2017г. Европа е използвала едва 12.7% (Global bioenergy statistics, 2019) възобновяема енергия.

Настоящата статия има за цел да даде още един метод и технология за превръщане на биомасата в гориво.

### История

Има исторически сведения от дълбока древност за използване на дървени въглища както за отопление, така и в металургията - отчалото на цветни метали, а след това и на желязо. Начинът на получаване на дървени въглища е бил следният: изкопава се голяма яма в земята, в нея се подреждат дърва, върху тях се слагат клонове и листа, а най-отгоре се затрупва с пръст. Върху тези пластове се палат огънове в продължение на няколко дни. След угасването на огньовете се изчаква няколко дни за охлаждане и след това ямите се разриват. Готовите дървени въглища се извличат от ямата. За жалост и в момента в доста недотам развити страни все още този метод се практикува.

С годините методите за получаване на дървени въглища се усъвършенстват (Conner, 2011; Wang, 2010). Използват се камери, в които се нарежда дървен материал. Камерите се затварят и се загряват индиректно.



Обикновено се изграждат няколко камери. Газовете, получени при нагряване на дървесината в отсъствие на кислород се извеждат от камерата и служат за гориво в същата или съседна камера. Процесът се нарича пиролиза. Температурните режими за получаване на дървен въглен са различни. По-долу са дадени фазите на процеса:

- изсушаване 20-150°C
- предварителна карбонизация 50-275°C
- карбонизация 75-400°C
- калциниране 450-500°C

Както се вижда, част от процесите протичат съвместно.

В съвременното дървен въглен и получения от него активен въглен имат значително приложение като например: химическата промишленост, фармацевтиката, хранително-вкусовата промишленост, металургията, отоплението и др.

### Суровини

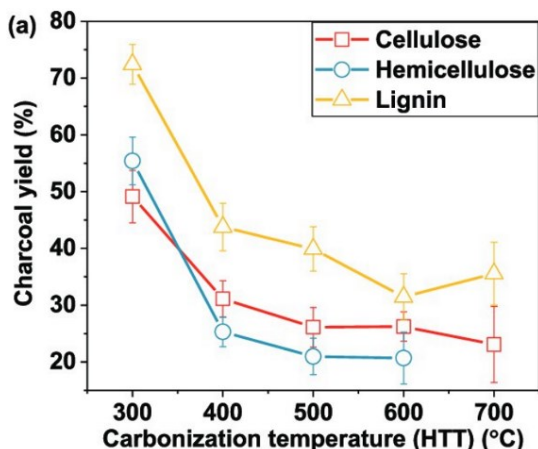
В настоящата статия разглеждаме като суровина за производството на дървен въглен селскостопански отпадъци, както и отпадъци от дървопреработващата промишленост.

Всички тези суровини съдържат в себе си в различно съотношение следните вещества: целулоза, хемичелулоза, лигнин. В таблица 2 са показани елементите, които се съдържат в абсолютно сухи суровини (Иосифов, 2005).

Таблица 2. Съдържание на основни химични елементи в %

Вид биомаса	C	H	O	N	S
Бор с кората	49,5	6,5	42,6	0,12	0,014
Смърч с кората	49,8	6,3	43,2	0,13	0,015
Бук с кората	47,9	6,2	45,2	0,22	0,015
Слама пшеница	45,6	5,8	42,4	0,48	0,082
Слама ръж	46,6	6	42,1	0,55	0,085
Слама просо	47,5	5,8	41,4	0,46	0,089

На фигура 2 е представена диаграма на добива на дървен въглен в зависимост от температурата на процеса на пиролиза и веществата съдържащи се в изходящия материал (Xiao, 2020).

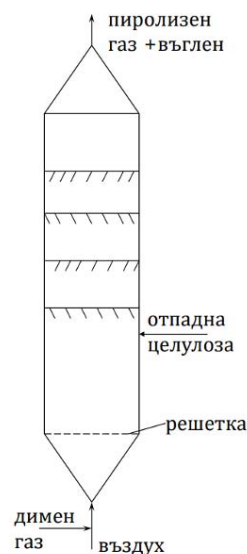


Фиг. 2. Добив на дървен въглен като функция на температурата и съдържанието в изходящия материал.

На фигурата по абсцисата е нанесена температурата, а по ординатата – добивът на въглен. Вижда се, че използването на материали с по-високо съдържание на лигнин, ще доведе до по-висок добив на въглен.

### Представяне на технологията

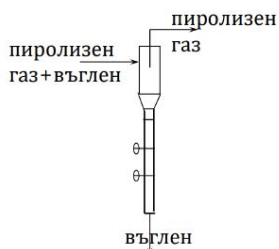
Целта на технологията е да създаде подобрен и по-ефективен метод за получаване на брикети от дървени въглища от средни дървесни или нарязани растителни отпадъци (по-долу ще бъдат наричани целулозни отпадъци). Нарязаните целулозни отпадъци се изсушават и се пиролизират. Полученият въглен се охлажда и се смесва с вода и свързващо вещество, брикетира се и се суши. Характерна особеност за метода е, че сушенето и пиролизирането се извършват в един апарат при директна обработка на продукта със смес от пиролизни и димни газове. Тази смес се получава при подаване на предварително подгрят въздух и горещи димни газове. Заедно с кислорода от въздуха изгаря и част от получените при пиролизата на целулозните отпадъци летливи органични продукти – водород и въглероден оксид. При това се получава необходимата топлина за сушене и пиролиза на целулозните отпадъци. Началната температура на подаване на сместа от въздух и димни газове в апарата за пиролиза е в границите от 350-500°C, а температурата на изход от апарата е за предпочитане 350-450°C. Сместа от пиролизни и димни газове след извършване на пиролизния процес се отделя от частиците на въглена и се изгаря. Част от получените димни газове се използват за подгряване на въздуха, друга част - за сушене на брикетите от дървен въглен, а трета част се смесва с въздуха и се използва при сушенето и пиролизирането на отпадъчната целулоза. Сушенето на брикетите се осъществява преимуществено в поток от димни газове, получени при смесването на горещи димни газове с димни газове охладени в сушилната.



Фиг. 3. Вертикален пиролизатор

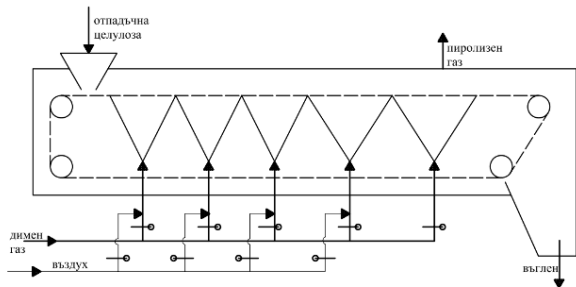
**Модификация 1:** Една модификация на метода е отпадъчната целулоза да се подаде в средата на апарата (фиг.3). Частиците, постъпили за сушене и пиролиза в зависимост от тяхната скорост на витаене се разделят на

две части. По-леките частици се изнасят с газовия поток, сушат се и се пиролизират във възходящ правоток. По-едриите частици се спускат надолу, изсушават се и се пиролизират частично в противоток на газовия поток. Пиролизата на тези частици протича основно в долната част на апарата, където се получава подвижен слой. Частиците се олекотяват поради изсушаване и пиролизиране, надробвяване поради удари една в друга, както и в стените на апарата. Олекотените частици се отнасят от газовия поток. Основната част от всички частици се отделя от газовия поток посредством циклон или батерия от циклони, след което пиролизните газове се смесват с въздух и изгарят. Отделените в циклона частици престояват в забавителя около 10-60 секунди, за да се завърши пиролизния процес за сметка на топлината от нагряването им.



Фиг. 4. Циклон с времезабавител

Пиролизираните частици се смесват с вода и слепващо вещество, охлаждат се и се формират в брикети. Брикетите се сушат в поток от димни газове, охлаждат се и се изваждат като готов продукт.



Фиг. 5. Хоризонтален пиролизатор

**Модификация 2:** Съгласно друга модификация на метода, обработеният материал се движи преимуществено хоризонтално (фиг. 5), като се обработва с газови потоци с различна концентрация на въздух. Тази концентрация се регулира чрез подаване на необходимия за извършване на процеса въздух и чрез дебита на циркулиращите димни и пиролизни газове.

Инсталацията за получаване на брикети от дървен въглен, получен при пиролиза на отпадна целулоза, включва следните блокове:

- Блок сушене и пиролиз
- Блок за сепарация на въглена и допълнителен пиролиз
- Блок за охлаждане на въглена
- Блок за смилане на въглена
- Блок за формиране на брикети
- Блок за сушене на брикети
- Блок за подготовка на въздуха
- Блок за първоначално пускане (горелка)



Фиг. 6. Брикети от дървени въглища

Полученият продукт (фиг.6) брикети от дървени въглища има редица преимущества пред самите дървени въглища. Плътноста на брикетите е около 2 пъти по-голяма от тази на дървения въглен, а calorичността в единица обем се увеличава 2 пъти. Скоростта на горене на брикетите е по-малка, което дава възможност за по-добро разпределение на получената от тях топлина.

Представената технология е защитена с патент (Колев, 2008) (фиг.7).

РЕПУБЛИКА БЪЛГАРИЯ (19) BG (11) 65547 B1  
ОПИСАНИЕ КЪМ ПАТЕНТ ЗА ИЗОБРЕТЕНИЕ

ПАТЕНТНО ВЕДОМСТВО

(21) Заявителски № 107491  
(22) Заявено на 23.01.2008  
(24) Начело на действо на изобретението:

Привремени данни (33)  
(41) Публикувана заявка и бележка № 8 на 23.08.2008  
(45) Отпечатано на 28.11.2008  
(46) Публикувано в бележка № 11 на 28.11.2008  
(50) Информационен източник: БУД БИОТЕХНОЛОГИИ АС КЕК-БИОТЕХНИК  
(62) Разделена заявка от заяв. №

(73) (72) Патентополучител(и) и изобретител(и):  
ДИМИТЪР НИКОЛАЕВ КОЛЕВ  
ИЛИО СТОЯНОВ, УИ. "ЧУГУРЛИТЪН" 18, АИЛ. 8, ЕТ. 6

(74) Предлагачи по индустриална собственост:

(86) № и дата на РСТ-заявка:  
(87) № и дата на РСТ-публикация:

(54) МЕТОД И ИНСТАЛАЦИЯ ЗА ПОЛУЧАВАНЕ НА БРИКЕТИ ОТ ДЪРВЕНИ ВЪГЛИЩА ОТ ДЪРВЕНИ ДЪРВЕНИ ЧАСТИЦИ ИЛИ НА РАСТИТЕЛНИ РАСТЕТЕЛНИ ОТПАДЪЦИ

(57) Изобретението се отнася до метод за получаване на брикети от дървени частици от дървени дървени частици или парчета растителни отпадъци, както и до инсталация за осъществяването му. Методът и инсталацията могат да намират приложение при производството на брикети от дървени отпадъци, от дървени дървени частици и растителни отпадъци, като дървени труши, пясък, сено, селитровидни смеси и други. По метода дървените частици и растителните отпадъци се сушият, пиролизират се, а получените въглища се охлаждат и смесват с вода и свързващо вещество, брикетират се и се сушат. Пиролизният процес се извършва на два етапа - основен и допълнителен пиролиз. Сушенето на суровината и основната пиролиза се извършват в един апарат, при директна обработка на продуктите със смеси от горещи пиролизни и димни газове. Така смес се получава при подаването на продукта в горещ въздух и горещи димни газове. Инсталацията включва блок за основна пиролиза (1), блок за сепарация на въглена (2), втори реактор за допълнителна пиролиза (11), блок за охлаждане

13 претенции, 8 фигури

Фиг. 7. Патент на представяната технология (Д. Колев)

## Заклучение

Представената технология има редица преимущества пред сега използваните технологии, а именно: значително по-малко производствен персонал, тъй като значителна част от процесите са автоматизирани; по-голяма скорост на протичане на процеса на пиролиза; инсталацията е компактна и при нужда може да се транспортира, вместо да се транспортират значително по-големите обеми от отпадъчни суровини. Важно е да се отбележи, че calorичността на дървения въглен и получените брикети за единица вещество са с еднаква calorичност.

Представяната технология превръща нискоcalоричната и обемна 300 кг/м<sup>3</sup> отпадна целулоза с calorичност около 14,5 MJ/kg в един продукт с високо относително тегло около 900 кг/м<sup>3</sup> и голяма calorичност около 28 MJ/kg, който може лесно да се транспортира. Така полученото екологично гориво може да замести въглищата в домашното отопление. То дава още една алтернатива за използване на отпадъчната целулоза като един високоенергиен продукт.

## **Литература**

- Директива на европейския съюз 2023/2413 <https://eur-lex.europa.eu/legalcontent/BG/TXT/?uri=CELEX%3A32023L2413>
- Global bioenergy statistics 2019 [https://worldbioenergy.org/uploads/191129%20WBA%20GBS%202019\\_HQ.pdf](https://worldbioenergy.org/uploads/191129%20WBA%20GBS%202019_HQ.pdf)
- Xiao, F., Bedane, A., Mallula, S. (2020). *Production of granular activated carbon by thermal oxidation of biomass charcoal/biochar for water treatment in rural communities : A mechanistic in investigation. Chemical Engineering Journal Advances* DOI: 10.1016/j.cej.2020.100035
- Йосифов, Н. (2005). *Брикети и пелети от растителна биомаса*. ISBN 954-07-2209-8
- Колев, Д. (2008). *Метод и инсталация за получаване на брикети от дървени въглища от дребни дървени частици или нарязани растителни отпадъци*. BG 65547 B1
- Conner, G., Baxter F. (2011). *Apparatus and method for processing biomass*. патент на Австралия AU 2015246130 B2
- Wang, X., Jing, J., Zhang, S. (2010). *Method and device for carbonization of crop straws* патент на САЩ US 10273412 B2

## ANALYSIS OF THE ATMOSPHERIC AIR QUALITY OVER THE SOFIA – EAST THERMAL POWER PLANT

**Nikolay Kolev, Maya Vatzkitcheva, Kalinka Velichkova, Dimitar Dimitrov, Ava Gogureva,  
Atanas Atanasov**

University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia; E-mail: nic\_k@abv.bg

**ABSTRACT.** There are many sources of urban air pollution: transport, domestic heating, agriculture and industry (thermal power plants and others). Without an analysis of the relative share of each source, its weight in pollution cannot be calculated with certainty. In October 2019, Sofia was the dirtiest city in the world for 4 successive days. Thermal power plants in Sofia contributed largely therein. To study the processes of dispersion of aerosol impurities in the atmosphere, an ever increasing number of large-scale and in-depth experimental studies of these processes have been organised in recent decades. Correlation dependences between the spatial and temporal distribution of aerosol and major meteorological parameters, such as atmospheric stability, wind direction and speed, air humidity, and the presence of temperature inversions, are sought. The aim of this work is to study the distribution of particulate matter and its connection with meteorological data in the atmosphere above a thermal power plant in the city of Sofia

**Key words:** particulate matter, ABL, dispersion, thermal power plant, meteorological parameters.

**АНАЛИЗ НА КАЧЕСТВОТО НА АТМОСФЕРНИЯ ВЪЗДУХ НАД РАЙОНА НА ТЕЦ „СОФИЯ-ИЗТОК“**  
**Николай Колев, Майя Вацкичева, Калинка Величкова, Димитър Димитров, Ава Гогурева, Атанас Атанасов**  
*Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София*

**РЕЗЮМЕ:** Съществуват много източници на замърсяване на градския въздух: транспорт, битово отопление, земеделие и индустрия, (топлоелектрически централи и други). Без анализ на относителния дял на всеки източник не може да бъде изчислена неговата тежест в замърсяването. През месец октомври 2019 година София в продължение на 4 дни е градът с най-замърсен въздух в света, за което основен принос имат и ТЕЦ-вете в София. За изучаване на процесите на дисперсия на аерозолните примеси в атмосферата в последните десетилетия се организират все по-мощни и задълбочени експериментални изследвания на тези процеси. Търсят се корелационните зависимости между пространственото и времево разпределение на аерозола и основните метеорологични параметри, като устойчивост на атмосферата, посока и скорост на вятъра, влажност на въздуха и наличие на температурни инверсии. Цел на настоящата работа е да се направи изследване на разпределението на фини прахови частици и връзката им с метеорологичните данни в атмосферата над топлоелектрическа централа в град София.

**Ключови думи:** фини прахови частици, АГС, дисперсия, ТЕЦ, метеорологични параметри

### Въведение

Пространствената и времева изменчивост на концентрации на финни прахови частици (ФПЧ) и установяване на връзките им с метеорологичните условия и източниците на замърсяване в ТЕЦ София (квартал Дружба 2) са основната цел в представената работа. ТЕЦ „София Изток“ работи на непрекъснат режим на работа. Производствената площадка на ТЕЦ „София Изток“ съдържа инсталации, предназначени за производство на електрическа енергия, гореща вода за топлоснабдителната мрежа на района и пара за намиращите се в съседство промишлени предприятия. Основен енергоносител (основна производствена суровина) е природният газ, а основният технологичен носител на топлинната енергия е водата. Централата е с обща топлинна мощност 2015,4 MWh, която работи с основно гориво природен газ и резервно (аварийно гориво) мазут.

Прахта е един от основните замърсители на въздуха, като основните ѝ източници са промишлеността, транспорта и енергетиката. Естествено тя има вредно влияние върху човешкото здраве, което зависи главно от размера и химичния състав на праховите частици. По-едриите прахови частици (от 2.5  $\mu\text{m}$  до 10  $\mu\text{m}$  - PM10) при попадане в организма чрез дихателната система, се задържат в горните дихателни пътища, а по-фините (под 2.5  $\mu\text{m}$  - PM2.5) достигат до по-ниските отдели на диха-

телната система и водят до увреждане на тъканите в белия дроб. Аерозолите представляват аеродисперсни системи - смес от атмосферен въздух и диспергирани в него фини частици в твърдо или течно агрегатно състояние. Аеродисперсна система с твърда дисперсна фаза се нарича прах или дим, а с течна - мъгла. От всички аеродисперсни системи, най-голямо значение за замърсяването на атмосферата има прахта. Една от причините за това е, че главна част от праховите аерозоли остава в тропосферата като 80% от тях се локализира на височина до 1 km (т.е. в атмосферен граничен слой). Прахта, като замърсител на въздуха, се характеризира с някои особености, свързани главно с нейното физическо състояние в аеродисперсната система, които я отличават от газовете и парите. Основните параметри отнасящи се до поведението на прахта и нейното хигиенно значение са: концентрация, размери, форма, специфично тегло и химичен състав на дисперсната фаза. (Мариана Дончева-Бонева, 2009) Влиянието, което оказва подложната повърхност върху тропосферата може да бъде разделена на два слоя: атмосферен граничен слой (АГС), долната граница на който е земната повърхност, а горната достига до 1000 - 1500 m и свободна атмосфера. (Оке, Т.Р. 1987) По дефиниция, атмосферният граничен слой е тази най-долна част от тропосферата, която е директно повлияна от земната повърхност и откликва на въздействието ѝ във времеви интервал от един час или по-малко. Това въздействие включва триене, изпарение и кондензация,



топлообмен, излъчване на замърсители и промени в характера на въздушния поток под действието на грападостта и на релефа. (Stull, 1988). Замърсяването на въздуха в градска среда е свързано с физични и химични процеси, вариращи в широк пространствен и времеви диапазон. На разстояния от 10 до 30 километра в хоризонтално направление, природата на АГС е тази, която определя разпръскването на замърсителите от източници, разположени близо до земната повърхност. (Oke, T.R. 1987, Savov, P. et al. 2021, Tuhin Beraet al. 2021). Емисиите на вредни вещества от автомобилния трафик и дейността на съществуващите топлоелектрически централи на територията на София намаляват в определена степен през лятото и есента, а за транспорта и няколко часа през нощта, около 1,3 милиона жители са засегнати от наднормено замърсяване на въздуха през твърде голяма част от годината в Столицата ФПЧ10 се емитират главно от индустриални горивни инсталации и от автомобилния транспорт, а през зимния период, значителен принос има и употребата на твърди горива (дърва и въглища) за отопление. (Guttikunda K et al. 2014, Xue, W.; et al. 2016, Zeng, M et al. 2017, Tang, L et al. 2019)

### Експериментални данни

Измерванията са проведени на 05.04.2024 г. в района на София - ТЕЦ София Изток (квартал Дружба 2). Масовата концентрация на ФПЧ е измерена с преносими лазерни броячи на частици BQ20 –Trottec, измерващи в два канала: канал 1 (0 – 2,5  $\mu\text{m}$ ) и канал 2 (2,5 - 10  $\mu\text{m}$ ), обозначени по-нататък в текста съответно като PM<sub>2,5</sub> и PM<sub>10</sub>. Концентрациите се измерват на момента, като скоростта на вземане на проби е 0,9 l / min. Точността на устройствата е в диапазона от 15-20%. Метеорологичните параметри са измервани със станция PCE-FWS 20-1, тя позволява точно измерване на посоката и скоростта на вятъра чрез анемометър, на температурата и относителна влажност на въздуха чрез термохигрометър. Измерваните параметри са: температура в градуси по Целзий, относителна влажност в % RH, атмосферно налягане в hPa, посока и скорост на вятъра съответно в deg и m/s. (Kolev, N et al. 2019, Vatzkitcheva, M. et al. 2020)

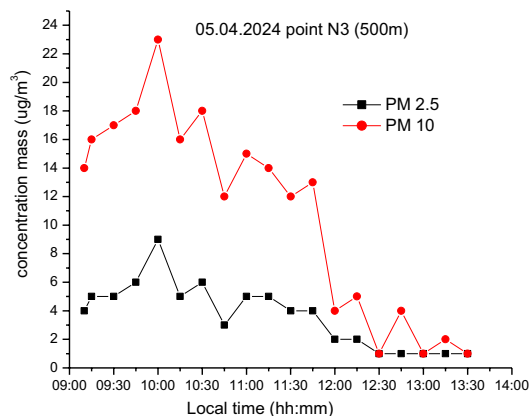
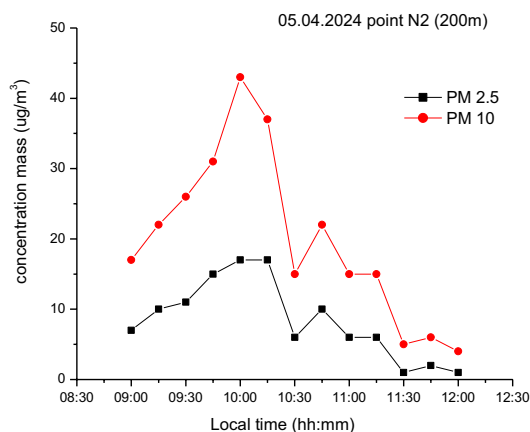
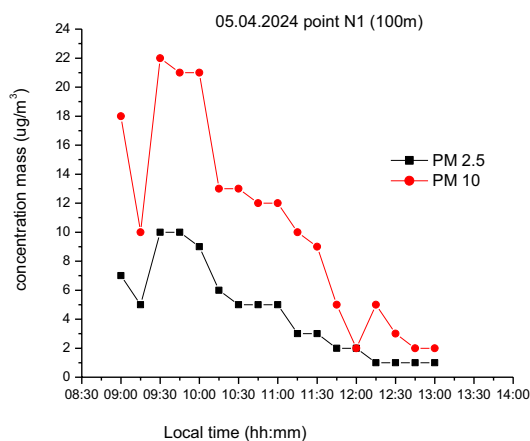


Фиг. 1. Карта на района с измервателните точки ТЕЦ „София-Изток“.

На фигура 1 са представени точките на измерване на концентрацията на фини прахови частици и метеорологичните параметри в четири пункта съответно: на разстояние от 100 м от централата точка №1, точка №2 на разстояние от 200 м, точка №3 на разстояние от 500 м и последната точка №4 на разстояние от 2000 м.

### Дискусия и анализ на данните

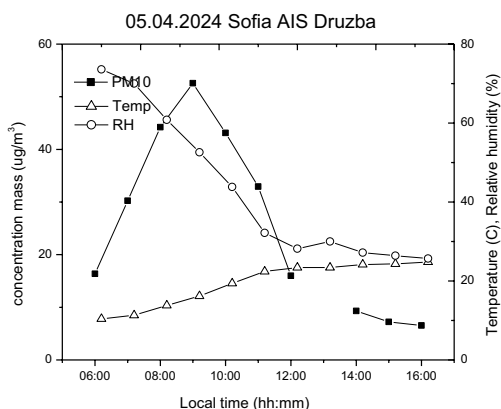
Данните от измерванията и анализа са за периода 01.01.2024 - 10.04.2024г, като са разгледани по-задълбочено два дни. (01.01.2024 и 05.04.2024)



Фиг. 2. Концентрация на ФПЧ с размери 2,5  $\mu\text{m}$  и 10  $\mu\text{m}$  (масова концентрация -  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) на разстояние от ТЕЦ „София Изток“ 100 м, 200 м и 500 м на 05.04.2024 г

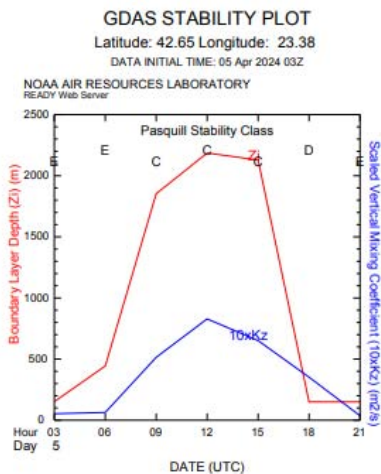
На фигура 2 е изобразена масовата концентрация на 05.04.2024 г. (PM10), която варира в диапазона от 43  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  в 10:00 ч. до 1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  в 13:30 ч., масовата концентрация (PM2.5) 15  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  в 10:00 ч. до 1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  в 13:30 ч. В точка на измерване №1 на 100 м от източника на замърсяване се наблюдават концентрации в диапазона 22  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  - 2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  за PM10, и 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  - 1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  за PM2.5, в точка №2 на 200 м от ТЕЦ София Изток концентрациите са съответно 45  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  - 5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  за PM10, и 15  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  - 1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  за PM2.5, а в точка №3 на 500 м от ТЕЦ са 24  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  - 2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  за PM10, и 9  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  - 1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  за PM2.5

Точка №2 се характеризира с това, че се намира на пътно кръстовище, което допълнително натоварва концентрацията на частици с емисия от автомобилния трафик.



Фиг. 3. Концентрация на ФПЧ с размери 10  $\mu\text{m}$  (масова концентрация -  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), температура и относителна влажност на разстояние от ТЕЦ „София Изток“ 2000 м на 05.04.2024 г.

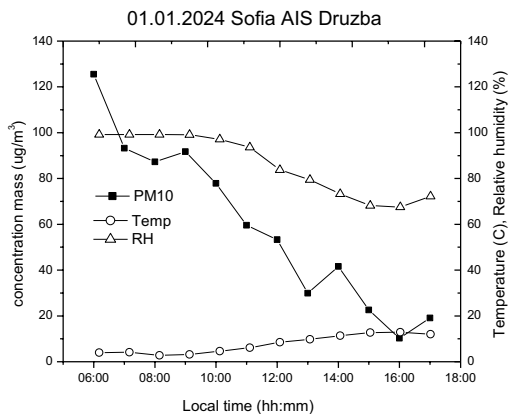
На фигура 3 е представена масовата концентрация на ФПЧ с размери 10  $\mu\text{m}$ , температура и относителна влажност на атмосферата на разстояние от 2000 м от ТЕЦ София Изток. Концентрацията на (PM10) варира в диапазона от 54  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  в 09:00 ч. до 7  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  в 16:00 ч., температурата е в интервала 16°C до 24°C и относителната влажност е 70% до 30%. Скоростта на вятъра е между 1-2 m/s, като преобладава вятърът от западна посока тоест духа от центъра на града към централата.



Фиг. 4. Модел WRF-GDAS - прогноза за височината на АГС за (42.65N, 23.38E) София на 05.04.2024 г.

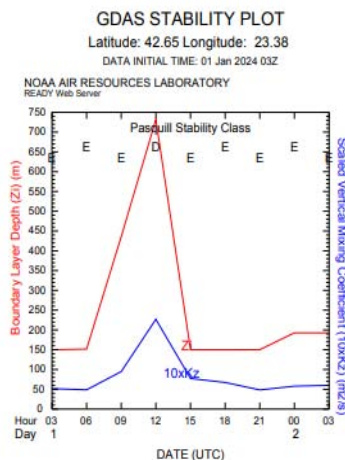
Представени са резултати на височината на атмосферния граничен слой (АГС) в София по моделни данни за два дни на фигура 4 за 05.04.2024 г. и фигура 6 за 01.01.2024 г.

На фигура 4 е представена АГС с максимална височина 2100 м в 12:00 ч. UTC + 2 часа за българско часово време и съответно на фигура 6 е представена АГС за 01.01.2024 г. с максимална височина от 730 м. Разликата във височината на атмосферния граничен слой по данни от WRF-GDAS, разработени от ARL-NOAA, с помощта на които се определя по моделни данни височината на АГС е 3 пъти за двата сравнявани дни. (Draxler, R. R.. 1979, Draxler, R. R. et al. 1998, Stein A. et al. 2015)



Фиг. 5. Концентрация на ФПЧ с размери 10  $\mu\text{m}$  (масова концентрация -  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), температура и относителна влажност на разстояние от ТЕЦ „София-Изток“ 2000 м на 01.01.2024 г.

На фигура 5 е представена масовата концентрация на PM10, температура и относителна влажност на атмосферата на разстояние от 2000 м от ТЕЦ София Изток. Концентрацията на (PM10) варира в диапазона от 125  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  в 06:00 ч. до 20  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  в 17:00 ч., температурата е в интервала 4°C до 12°C и относителната влажност е 95% до 70%.



Фиг. 6. Модел WRF-GDAS - прогноза за височината на АГС за (42.65N, 23.38E) София на 01.01.2024 г.

Нахлуващите въздушни маси са с присъстваща западна компонента. При нахлуване от тази посока, въздушната маса е преминала през целия град и е силно повлияна от него. При случай на нахлуване, със западна

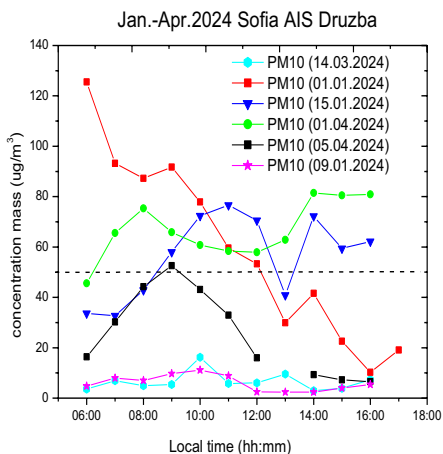
компонента, тоест „градски тип въздушна маса“ имаме разпространение на замърсяването или повишена концентрация от центъра на София към периферията.

Метеорологична обстановка по време на експеримента беше както следва: За сутрешните измервания на 05.04.2024 г. около 10 ч.: температура на въздуха 19°C в 12:00 ч. е около 23°C; скорост на вятъра 1-2 m/s; посока запад; слънчева радиация –740 W/m<sup>2</sup>.

За сутрешните измервания на 01.01.2024 г. около 10 ч.: температура на въздуха 5°C; скорост на вятъра 1-2 m/s; посока изток- запад; слънчева радиация – 150 W/m<sup>2</sup>.

Стойностите на метеорологичните параметри по време на експеримента ни дават основание да предположим, че класът на устойчивост на атмосферата е между С, D и E.

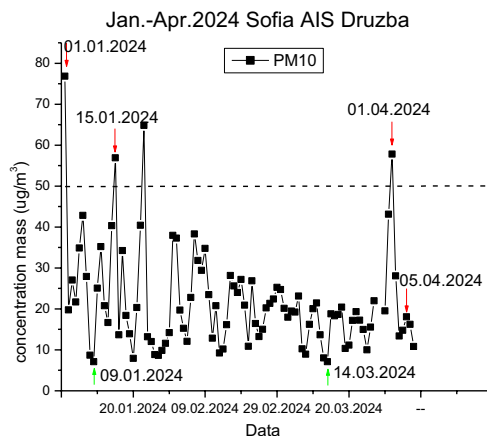
При дисперсионното моделиране, способността на атмосферата за движение във вертикална посока се определя чрез въведените за целта категории на устойчивост на атмосферата. В качествено отношение тези категории са известни със следните означения: А – силно неустойчива атмосфера; В – умерено неустойчива атмосфера; С – неустойчива атмосфера; D – неутрална атмосфера; Е – слабо устойчива атмосфера; F – устойчива атмосфера (Draхler, 1979). Състоянието на атмосферното замърсяване и способността на атмосферата да се самоочиства е пряко свързана с конкретна стратификация и клас на устойчивост на приземната атмосфера.



Фиг. 7. Концентрация на ФПЧ с размери 10 µm (масова концентрация - ug/m<sup>3</sup>), на разстояние от ТЕЦ „София-Изток“ 2000 м на 01.01.2024 г., 09.01.2024 г., 15.01.2024 г., 14.03.2024 г., 01.04.2024 г. и 05.04.2024 г.

На фигура 7 е изобразена масовата концентрация PM10 за 6 дни (01.01.2024 г., 09.01.2024 г., 15.01.2024 г., 14.03.2024 г., 01.04.2024 г. и 05.04.2024 г.), варираща в диапазона от 124 µg/m<sup>3</sup> в 06:00 ч. до 5 µg/m<sup>3</sup> в 16:30 ч., като 01.01.2024 г., 15.01.2024 г., 01.04.2024 г. и 05.04.2024 г. са дни с превишения над 50 µg/m<sup>3</sup>, докато 09.01.2024 г. и 14.03.2024 г. са дни с концентрации под 10 µg/m<sup>3</sup>, тоест това са едни от най-чистите дни в направеното изследване.

На фигура 8 е представена масовата концентрация PM10 за периода на изследването 01.01.2024 г. - 10.04.2024 г.



Фиг. 8. Концентрация на ФПЧ с размери 10 µm осреднена за 24 часа (масова концентрация - ug/m<sup>3</sup>), на разстояние от ТЕЦ „София-Изток“ 2000 м за времеви интервал от 01.01.2024 г. до 07.04.2024 г.

Трендът на концентрацията на финни прахови частици се движи около 30 µg/m<sup>3</sup>, като само няколко дни са със превишения над 50 µg/m<sup>3</sup> за цял ден усреднена стойност, което показва една тенденция на сравнително чиста атмосфера за района на ТЕЦ София Изток за зимните месеци на 2024 г. - периодът на нашето изследване.

## Заклучение

Това изследване представя резултати от експеримент в София (ТЕЦ София Изток) за оценка на връзката на АГС и микрофизични характеристики на атмосферния аерозол с помощта на устройства за измервания на място и моделни данни. От анализа на експерименталните данни на аерозола в атмосферата, могат да се направят няколко извода: Измерените нива на масовата концентрация на финните прахови частици за диапазона 10 µm са 1.5 – 2 пъти под средноденонощните пределно допустими концентрации. Височината на атмосферния граничен слой оказва силно влияние върху концентрацията на финни прахови частици, като с повишаване на височината на АГС концентрацията на PM10 бързо намалява. Върху разсейването на емитираните замърсители в приземния слой на атмосферния въздух влияят и редица други фактори с твърде сложна схема на тяхното съвместно въздействие върху качеството на атмосферния въздух като особености на релефа, метеорологични условия, климатични условия, гъстота и височина на застрояване, транспортна схема, възраст и състояние на МПС, състояние на инфраструктурата и др. През изследвания период над района на ТЕЦ София Изток качеството на атмосферата е относително добро с изключение на няколко дни, в които има превишаване на средно дневната норма от 50 µg/m<sup>3</sup>, което представлява един много добър резултат за тази част от годината.

През голяма част от времето скоростта на вятъра в Софийското поле е нулева или твърде ниска. В тези случаи отсъства или е твърде слаба хоризонталната вентилация на атмосферата, т.е. замърсителите на въздуха се натрупват в ниските слоеве на атмосферата. С

най-голяма честота за София са ветровете от запад-северозапад и изток-югоизток (роза на ветровете за София).

Мерки, които биха помогнали за подобряване на КАВ на територията на София:

- Създаване на нови тревни площи за сметка на площи – потенциални източници на прах.
- Увеличаване на уличното озеленяване и използването на рекултивационни мрежи.
- Въвеждане на изискване за екологично топлоснабдяване при одобряване на проекти и издаване на строителни разрешения.
- Контрол на състоянието на строителните площадки, с цел да не се допускат неорганизиран прахови емисии.
- Осъществяване на контрол за възстановяване на улици и тротоари след прокопаването им във връзка с ремонт или изграждане на елементи от техническата инфраструктура.
- Текущ и основен ремонт на пътната настилка на най-натоварените транспортни артерии в града.
- Замяна на отоплението с течни горива и преминаване към газ или централно топлоснабдяване в общинските сгради.
- Въвеждане на система за почистване на тротоари и др. обществени места от нападали листа със специализирана техника.
- Да не се допуска използване на пясъчно солни смеси за зимно почистване в града.
- Увеличаване честотата на миене на уличната мрежа в т.ч. вътрешно-кварталните улици.
- Създаване на зелени пояси по периферията на натоварени пътни артерии и на града.
- Съдействие и улесняване на процедурите за газификация на домакинствата.
- Разработване на план за действие за стимулиране използването на нови технологии за отопление.
- Стимулиране на използването на ВЕИ, включително ВЕИ за отопление с биогорива.

### Благодарности

Настоящото изследване е проведено във връзка с изпълнението на: Дог. ГПФ - 250, НИС-МГУ, Срок: III – XII.2024 г. „Пространствено и времево разпределение на фини прахови частици и корелацията им с метеорологичните параметри в атмосферата в района около ТЕЦ“. Ръководител: доц. д-р Н. Колев - катедра „Приложна геофизика“, научен колектив: доц. д-р Пламен Савов, доц. д-р Майя Вацкичева, гл. ас. д-р Калинка Величкова, гл. ас. д-р Димитър Димитров - катедра „Приложна геофизика“. Авторите изказват благодарност на NOAA Air Resources Лаборатория (ARL) за предоставяне на моделите WRF-GDAS и HYSPLIT, използвани в тази публикация.

### Литература

- Draxler, R. R. (1979). Estimating vertical diffusion from routine meteorological tower measurements, *Atmospheric Environment*, Vol. 13, Issue 11, 1559-1564.
- Draxler, R. R. and Hess, G. D. (1998). An overview of the HYSPLIT\_4 modelling system for trajectories. *Australian meteorological magazine*, 47 (4), 295-308.
- Guttikunda K., Puja Jawahar, (2014). Atmospheric emissions and pollution from the coal-fired thermal power plants in India, *Atmospheric Environment*, Vol 92, , Pages 449-460, <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.04.057>
- Мариана Дончева-Бонева, (2009). Оценка качеството на атмосферния въздух в района на „Марица Изток“ *FORESTRY IDEAS* 2/2009 (38)
- Kolev, N., P. Savov, M. Vatzkitcheva, K. Velichkova, D. Dimitrov, B. Vladkova, S. Toncheva. (2019). The impact of outdoor mining activities on atmospheric air quality in nearby settlements. *Journal of Mining and Geological Sciences*, Volume 62, Number 2, pp. 45-49.
- Oke, T.R. (1987). *Boundary Layer Climates*, 2nd edn. London: Methuen, 435 pp.
- Savov, P., N. Kolev, M. Vatzkitcheva, K. Velichkova, D. Dimitrov, B. Vladkova. 2021. Urban parks and their relation to air pollution. *Annual of University of mining and geology "St. Ivan Rilski" – Sofia*, volume 64, pp. 81-86.
- Vatzkitcheva, M., K. Velichkova, N. Kolev, P. Savov. (2020). A study of horizontal distribution pattern of particulate pollutants near a highway, *Annual of University of mining and geology "St. Ivan Rilski" – Sofia*, volume 63, pp. 113-117.
- Zeng, M.; Zhang, P.; Yu, S.K.; Liu, H. (2017). Overall review of the overcapacity situation of China's thermal power industry: Status quo, policy analysis and suggestions. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 76, 768–774.
- Tuhin Bera, Nirmal Kumar Mahapatra, (2021). Ranking of thermal power plants focusing on air pollution: A Neutrosophic assessment, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 316, 128250, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128250>
- Tang, L.; Qu, J.B.; Mi, Z.F.; Bo, X.; Chang, X.Y.; Anadon, L.D.; Wang, S.Y.; Xue, X.D.; Li, S.B.; Wang, X.; (2019). Substantial emission reductions from Chinese power plants after the introduction of ultra-low emissions standards. *Nat. Energy*, 4, 929–938
- Xue, W.; Xu, Y.; Wang, J.; Tang, X. (2016). Ambient air quality impact of emissions from thermal power industry. *China Environ. Sci.*, 36, 1281–1288.
- Stein A., Draxler R., Rolph G., Stunder B. J., Cohen M., and F. Ngan. (2015). NOAA'S HYSPLIT Atmospheric Transport and Dispersion Modeling System. *Bulletin of the American Meteorological Society* (Dec. 2015), 96 (12) 2059-2077
- Stull, R. B. (1988). An Introduction to Boundary Layer Meteorology, *Kluwer Academic Publisher*, Dordrecht, 670 pp.



## DEVELOPMENT OF A PROTOTYPE DRONE FOR UNDERGROUND CONDITIONS

*Alexander Krilchev*

*University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: krilchev@mgu.bg*

**ABSTRACT.** Health and safety risk management in underground work is of paramount importance. The application of inherently different methods to eliminate or limit the identified risk reduces the likelihood of creating conditions for incidents and accidents to occur. In this regard, the use of unmanned aircraft to control the parameters of the working environment, measure gas concentrations, control the state of the array and the working environment, etc. makes it possible to obtain accurate and reliable information about the conditions of the working environment and the dangers associated with the activities performed in underground conditions. On the basis of the information obtained, correct and appropriate decisions can be taken to reduce and limit the impact of the risk. In addition, the use of drones in emergency situations allows quick and accurate measures to be taken to eliminate accidents and their consequences.

**Key words:** risk, drone, power, design, motors, blades

### РАЗРАБОТВАНЕ НА ПРОТОТИП НА ДРОН ЗА РАБОТА В ПОДЗЕМНИ УСЛОВИЯ

*Александър Крилчев*

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

**РЕЗЮМЕ.** Управлението на риска за здравето и безопасността при работа в подземни условия е от първостепенно значение. Прилагането на различни по своята същност методи за елиминиране или ограничаване на установения риск намалява вероятността от създаване на условия за възникване на инциденти и злополуки. В тази връзка използването на безпилотни летателни средства за контрол на параметрите на работната среда, измерване на концентрациите на газове, контрол на състоянието на масива и работната среда и т.н. дава възможност за получаване на точна и достоверна информация за условията на работната среда и опасностите, свързани с изпълняваните в подземни условия дейности. На база на получената информация могат да се вземат правилни и адекватни решения за намаляване и ограничаване въздействието на риска. Освен това използването на дроне при аварийни ситуации позволява да се предприемат бързи и точни мерки за ликвидиране на аварията и последиците от нея.

**Ключови думи:** риск, дрон, захранване, проектиране, мотори, перки

### Въведение

Извършване на различни дейности при подземният добив на полезни изкопаеми, подземното минно, градско и тунелно строителство са едни от най-високо рисковите по отношение на безопасността. Основната причина за това са специфичните условия на труд, които създават предпоставки за възникване на аварии и злополуки. За недопускане създаването на такива условия се планират и прилагат различни мерки свързани с мониторинг на параметри на работна среда, контрол и управление на производствени процеси, машини и съоръжения, контрол на изпълнение на различните производствени дейности и т.н. Това може да бъде осъществено чрез използване на безпилотни летателни средства. Използването на дроне при работа в подземни условия е иновативен, високо ефективен и безопасен метод за събиране на точна и достоверна информация. Тази информация дава възможност за планиране и прилагане на подходящи превантивни и оперативни мерки свързани с осигуряване на безопасността на работещите в подземни условия. Не по-маловажно е и използването на дроне и при аварийни ситуации – пожари, експлозии, водни и кални пробиви, свличане на земни и скални маси и други аварии от подобен тип. Чрез получените данни от извършеното наблюдение могат да се прилагат адекватни мерки за спасяване на пострадали работници, ограничаване развитието на аварията и ликвидиране на последиците от нея.

### Условия влияещи върху полета на БЛА в подземни условия

Управлението на дроне в подземни условия е значително по-сложно в сравнение с управлението на

открито. Недоброто направляване на БЛА създава риск както за степента на изпълнимост на планираните за изпълнение задачи, така и за коректността на получените резултати. Освен това вероятността от увреждане на дрона под земята е значително по-голяма в сравнение с използването му при полеви условия. Условията и факторите, които създават трудности при управлението му са:

1. Наличие на ограничени пространства и препятствия по пътя на летене;
2. Слаба или липса на осветеност;
3. Наличие на прах;
4. Висока скорост на движение на въздушните потоци в минните изработки;
5. Наличие на вибрации от машини, съоръжения и оборудване работещи под земята;
6. Липса на GPS сигнал;
7. Лоша комуникация;

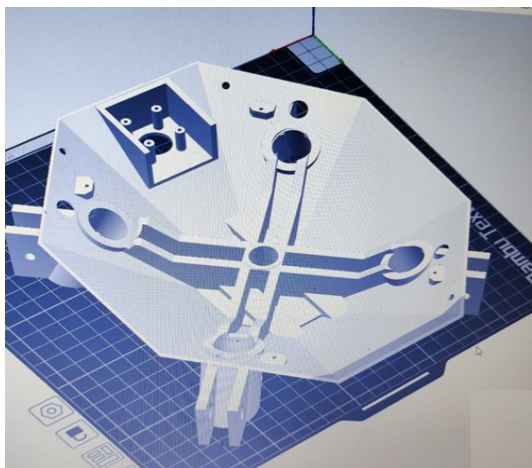
В зависимост от посочените условия и фактори рисковете при използване на дрон в подземни условия са свързани с опасност от удар в тавана или стените на минните изработки, удар в хора, машини и съоръжения, разположени по пътя му за движение. На следващо място наличието на прах създава условия за намалена видимост на камерите, замърсяване на сензорите и ненормална работа на двигателите. Високата скорост на въздушния поток в минните изработки създава трудности при управление на дрона. Наличието на вибрации от машини, съоръжения и оборудване създава опасност от смущения в работата на сензорите и устойчивостта на полета. Липса на GPS сигнал създава невъзможност за използване на GPS за позициониране и навигация, а лошата комуникация поради липса на радиосигнал или наличие на слаб сигнал създава риск както за неизпълнение на дадената работа

така и за целостта и функционалността на самото летателно средство.

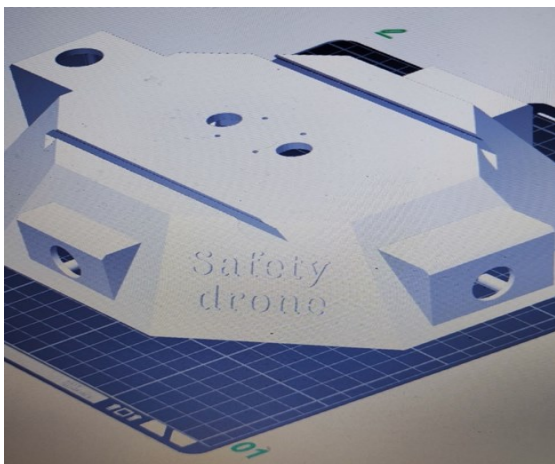
За да се елиминират или намалят опасностите при управление на полета е необходимо да се приложат комплекс от мероприятия свързани с контрола на полета, използване на мотори за компенсация, използване на специално оборудване и софтуер, използване на нови методи за навигация - инерционни навигационни системи, сензори и т.н.

### Конструирани на нов модел дрон за работа в подземни условия

Освен изброените мерки за намаляване на опасностите при управление на дрона, важно значение за ефективната и стабилна работа има здравината на конструкцията му. Голяма част от предлаганите на пазара дроне не са подходящи за работа в подземни условия. Използването на такъв тип БЛА трябва да отговаря на определени изисквания като едно от тях е здравината и устойчивостта на външни въздействия на конструкцията. Тя трябва да бъде достатъчно здрава за да не се деформира и чупи при удар в стените или тавана на минните изработки при удар в препятствия по пътя на движение, при падане на материал от тавана. За да се елиминира или минимизира този риск бе разработена нова конструкция на корпуса на дрон (фиг.1 и фиг.2), устойчив на външни въздействия.



Фиг. 1. Основа на дрона

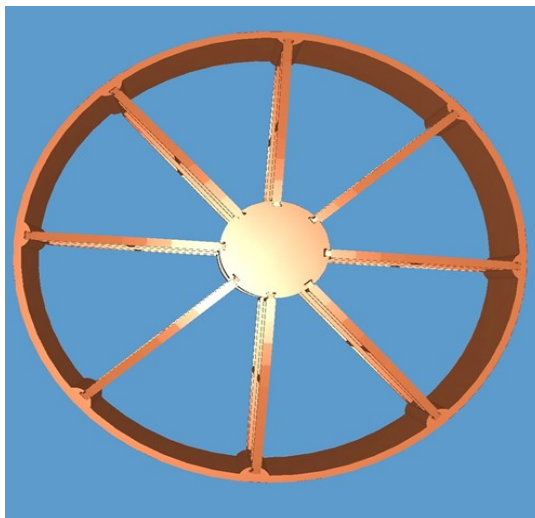


Фиг. 2. Капак на тялото на дрона

Освен нова конструкция на корпуса бе разработена и подходяща конфигурация за разполагане на тялото и перките (фиг. 3 и фиг.4) с цел оптимална работа на БЛА.

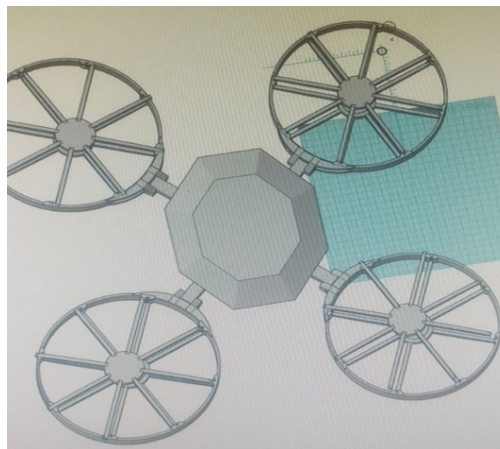


Фиг. 3. Конструкция на тялото на дрона

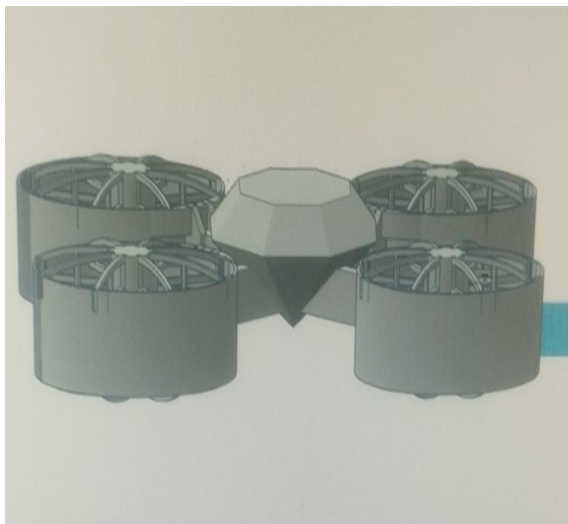


Фиг. 4 Конструкция на перката

Общият вид на новата конструкция на дрона е показана на фиг. 5а и фиг. 5б.



Фиг. 5а. Общ конструктивен вид на дрона



Фиг. 56. Общ конструктивен вид на дрона

След разработване на 3D модела на дрона се пристъпи към изработване на физическият му модел (фиг 6). Бяха избрани материали с необходимите якостни показатели за изработване за тялото, перките и предпазителите за тях. Освен това бяха избрани и двигатели с необходимите технически характеристики (таблица 1) за осъществяване на режима на полета на летателното средство.

Таблица 1. Технически характеристики на двигатели

Мотори		Перки	
Брой мотори	8	Размер на перките - in	8.5x5
KV рейтинг	925 KV	Брой перки	8
Максимална мощност - W	1100	<b>Контролер</b>	
Тегло на моторите - kg	0,067		
Максимални обороти в минута - (RPM)	20.350	Ground Station	Комплект лаптоп и телеметрия 915 MHz
<b>Рамка</b>		<b>Батерия</b>	
Общо тегло на дрона- kg	Карбон и алуминий 2.5	Тип	LiPo 6S
Сензори за заобикаляне на препятствия		Капацитет mAh	6800

Важен показател при избора на двигатели е времето за летене. То зависи от различни фактори, включително теглото, конфигурацията на моторите и перките, условията на летене и режима на полет. При капацитет на батерията 6800 mAh, напрежение 6S = 22.2V и мощност 150.96 Wh, времето за летене при консумация от 300 W е приблизително около 30 минути. При консумация обаче от 400 W времето за летене ще бъде около 22 минути.

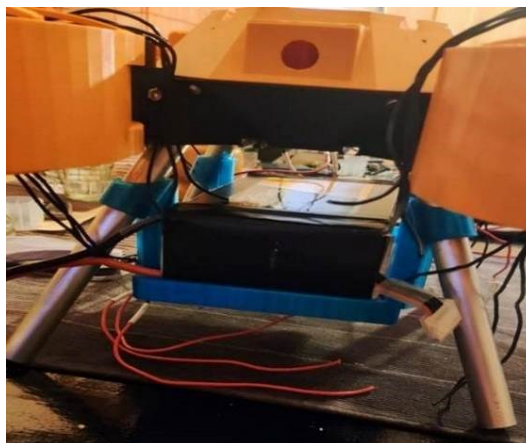


Фиг. 6. Общ вид на прототип на дрон

След създаване на физическият модел бяха проведени пилотни изпитвания свързани с определяне на времето за летене, стабилност при полет, тест за еластичност на тялото и якост на летателното средство. Получените опитни резултати (фиг. 7) дадоха възможност чрез извършване на корекции по тялото на дрона, захранването (фиг. 8) и вида и предпазителите на перките му (фиг. 9) да се подобрят, посочените технически характеристики

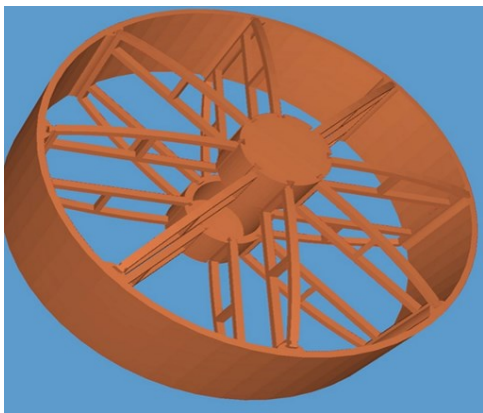


Фиг. 7. Състояние на дрона след падане от 10 метра



Фиг. 8. Захранване на дрона



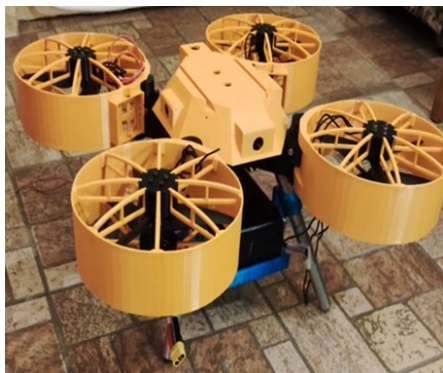


Фиг. 9. Предпазители на перките на дрона

Следващият етап от експерименталната част е насочена към изпитване на новата конструкция на дрона (фиг. 10) и оценка на ефективността на извършените подобрения.



Фиг. 10а. Нова конструкция на дрон



Фиг. 10б. Нова конструкция на дрон

## Заклучение

Създаването на здрав и устойчив на външни въздействия дрон с продължително време на летене, ще даде възможност да бъде оборудван със специфична апаратура и да бъде използван при аварийни ситуации. По този начин това ще даде възможност да се определи мястото и вида на аварията, последиците от нея, да се извършва дистанционен контрол на газовата обстановка при непригодна за дишане среда, оглед на мястото на аварията, издирване на пострадали работници, състояние на масива и крепежа. По този начин риска за работниците и спасителните екипи ще бъде минимален, а получената информация ще даде възможност да се прецени обстановката, да се оцени риска за безопасността и да се предприемат съответните мерки за оказване на първа помощ и ликвидирание на последициите от аварийната ситуация.

**Благодарности:** Авторът изказва специална благодарност на инж. Христо Танев за оказаното съдействие при разработване на прототипа на дрона.

## Литература

- Балев, В. (2018). 3D симулация при прокарване на тунел с помощта на 2D софтуер по метод на крайни елементи, *сп. „Минно Дело и Геология“*, бр. 5-6, ISSN 0861-5713 ISSN 2603-4549 (online).
- Костадинова, Н., Македонска, Д., Владкова, Б. (2023). Приложение на стационарни противопожарни системи в пътни тунели в България, *Пети международен симпозиум и изложба за подземни разкопки, UYAK2023 „Градове на бъдещето, градско тунелване и подземни разкопки“*, Истанбул, ISBN 9 78 -605-01-1568-0, стр. 477-488
- Makedonska D., Michaylov, M. (2019). Need for fixed fire fighting systems in road tunnels. *Journal of mining and geological sciences, Volume 62*, pp. 60-65, ISSN 1312-1820.
- Gorbounov Y., Dinchev, Z., Chen, H. (2022). Hazardous gas evaluation in the atmosphere of an open pit mine using wireless technology, *30th National Conference with International Participation “Telecom 2022”*, October 27 - 28, 2022, Sofia, Bulgaria, ISBN 978-1-6654-8212-7, IEEE Catalog Number CFP22V40-ART



# JUSTIFICATION OF THE METHODOLOGY OF CONTROLLING THE VOLUMES OF CRUSHED STONE STORAGE USING GEOINFORMATION SYSTEMS

*Maryna Kunytska, Volodymyr Shlapak, Andrii Kryvoruchko*

*State University "Zhytomyr Polytechnic", 10005 Zhytomyr, E-mail: km\_kms@ztu.edu.ua; v.shlapak@ztu.edu.ua, km\_kao@ztu.edu.ua*

**ABSTRACT.** Mineral reserve accounting is a key and responsible procedure that completes a comprehensive study of a deposit and determines its industrial value. At the same time, an important task of surveying support for mining operations is the determination of the volumes of mining operations and conducting drilling and blasting operations, as well as control over the volumes of crushed stone storages. Careful accounting of natural resources, their rational and integrated use is the main task of surveying works. Determining the volumes of crushed stone storages is an urgent scientific and practical task. Increasing the accuracy of determining the volume, the efficiency of this process, and the possibility of its automation make it possible to significantly increase the efficiency of the stone mining enterprise.

**Key words:** digitisation, crushed stone raw materials, volumes of crushed stone storage, tacheometric surveying, photogrammetric surveying.

## ОБОСНОВКА НА МЕТОДИКАТА ЗА КОНТРОЛ НА ОБЕМИТЕ НА СЪХРАНЕНИЕ НА НАТРОШЕН КАМЪК С ИЗПОЛЗВАНЕ НА ГЕОИНФОРМАЦИОННИ СИСТЕМИ

*Марина Куницка, Володимир Шлапак, Андрий Криворучко*  
*Държавен университет "Житомирска политехника", 10005 Житомир, Украйна*

**РЕЗЮМЕ.** Отчитането на запасите от полезни изкопаеми е ключова и отговорна процедура, която завършва цялостното проучване на находището и определя неговата индустриална стойност. В същото време важна задача на геодезическата поддръжка на минните операции е определянето на обемите на минните дейности и извършването на сондажни и взривни операции, както и контролът върху обемите на складовете за трошокаменни суровини. Внимателното отчитане на природните ресурси, тяхното рационално и комплексно използване е основната задача на геодезическите работи. Определянето на обемите на складовете за трошен камък е спешна научно-практическа задача. Повишаването на точността на определяне на обема, ефективността на този процес и възможността за неговата автоматизация позволяват значително да се повиши ефективността на каменодобивното предприятие.

**Ключови думи:** цифровизация, трошокаменни суровини, обеми за съхранение на трошен камък, тахеометрично заснемане, фотограметрично заснемане.

## Introduction

Recently, there has been an increase in the demand for building materials in Ukraine. The economic development of Ukraine and EU countries has led to increased construction of roads, overpasses, residential buildings, structures, and other objects. This increases the demand for crushed stone, the primary building material among the natural stone materials used in construction (Cherniaiev et al., 2023). Natural crushed stone is a natural material formed by crushing rocks, gravel, and boulders, mining waste from ores, and processing non-ore minerals. Natural stone, from which crushed stone is obtained, is mined in quarries, crushed in crushers, and screened into different fractions. The most common rock for the production of crushed stone is granite (Bozhyk et al., 2022).

An essential factor in sustainable mining is high-quality surveying support for the mining and processing rocks to obtain high-quality crushed stone. Engineering support for the process of mining and processing crushed raw materials includes the performance of relevant work at all stages of the development of the deposit, namely: discovery of the deposit, calculation of explored reserves, implementation of elements of the technical project in the area, surveying support for drilling and blasting works, operational calculation of the volume of mining works, control over compliance with technical solutions, etc. In addition to the accuracy of surveying work, production processes require timely receiving of survey results (Saik et al., 2023).

The modern geodetic and surveying equipment market offers a wide selection of universal high-precision electronic tachometers, which can be used for various geodetic tasks. Many geoinformation systems allow you to process geodetic

measurement data and solve several tasks to extract crushed stone (Kunytska et al., 2023). Therefore, the performance of surveying works with the help of modern technical means of measurement, and processing of results with the help of special computer programs for determining the volumes of crushed stone storages is an urgent scientific and practical task.

## Theoretical part

Among the mining and surveying tasks, one of the most important is the calculation of mineral reserves, in particular, the choice of the most optimal method. Mineral reserves are the number of minerals discovered and estimated at the place of occurrence based on geological survey data of open deposits. (Armands et al., 2020).

The process of counting stocks includes the main stages:

- contouring of the deposit;
- distribution of reserves by economic value, degree of exploration, categories of occurrence, and mining conditions;
- determining the calculation parameters;
- quantitative calculation;
- assessment of the accuracy of the results.

Depending on the shape and conditions of the deposit, the nature of the change in the content of valuable components, the reconnaissance system and the density of reconnaissance points, and the goals and purpose of the calculation, different calculation methods are used. In practice, there are more than 20 such methods (Mantey and Aduah., 2021). In modern conditions, effectively controlling crushed stone raw materials in storages of crushed stone becomes an essential element for optimising production processes and resource management

(Mykhailov, 2024). Growing competition, requirements for product quality, and the need for efficient use of resources, all make the issue of accurate control of crushed stone volumes significant in order to ensure the stable operation of the enterprise (Levytsky and Tolkach, 2017).

In each mining enterprise, a surveyor needs to measure the volumes of warehouses of finished products or waste rock dumps. For this, they can use several methods, depending on the conditions in which the object of the shooting is located. The main types of measurement include tacheometric surveying and modern photogrammetric surveying using specialised software (Fomychov et al., 2018). Tacheometric surveying is the most common method for determining the volume of quarry mining operations. It is used for one-off and repeated surveys in all types of open-pit mining, especially in large quarries with a great depth of development.

To calculate the volume of crushed stone storage in the survey area, a storage of 20-40 mm of crushed stone fractions was selected. A *Nikon NPL-332* total station was placed near it to perform measurements and obtain values from the surface of the storage. The *Nikon NPL-332* total station provides high reliability and performance. The increase in productivity is achieved due to the ability to make high-precision distance measurements directly to objects without using reflective prisms. Tacheometric surveying is the most common method of surveying for quarries. Surveying is carried out by optical tacheometers with an accuracy of reading in a vertical circle of no less than 1 minute or automatic tacheometers with a vertical rail (Kovanič et al., 2024).

In the case of a control survey of the volume of crushed stone storage, the difference between the primary and control determinations of the volume should not exceed the values given in Table 1 below.

Table 1. The difference between the primary and control definitions of the volume of the crushed stone storage

Volume of the crushed stone storage, m <sup>3</sup>	Up to 200	200–500	500–2000	Over 2000
The relative difference between the two independent definitions is permissible, %	12	8	4	3

During the measurements, the total station's location was changed three times to remove the barrier from all sides. Fifty points were measured to enter them into the *AutoCAD Civil 3D* software.

Most points are located near the lower edge of the barrier to specify the contour of the barrier, and the rest are on the surface to determine the height in space. The location of points in the simulation space is shown in the figure (Fig. 1).

The next stage was the creation of two surfaces, which form the surface of the crushed stone storage and the surface of the area on which it is located.

Figures 2 and 3 show the simulation in space with different views and angles.

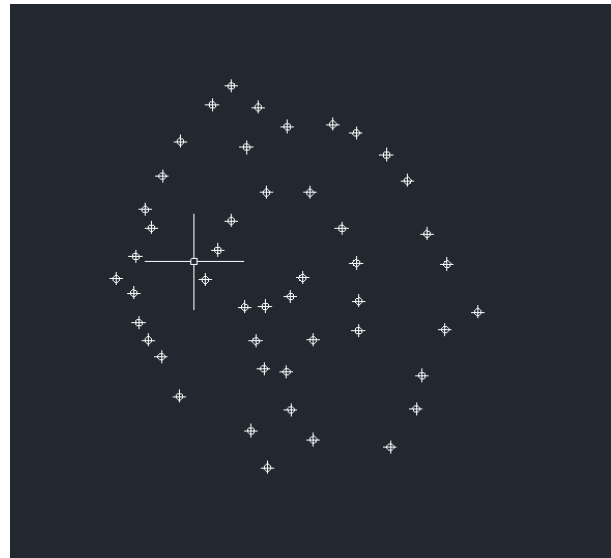


Fig. 1. Location of capture points in Civil 3D

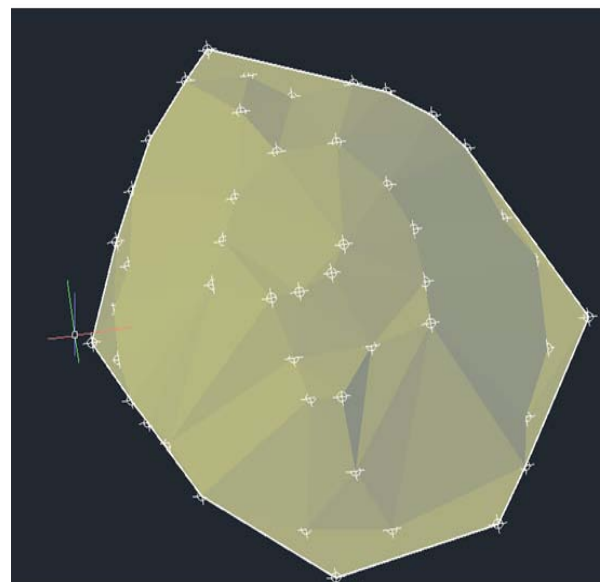


Fig. 2. Crushed stone storage surface

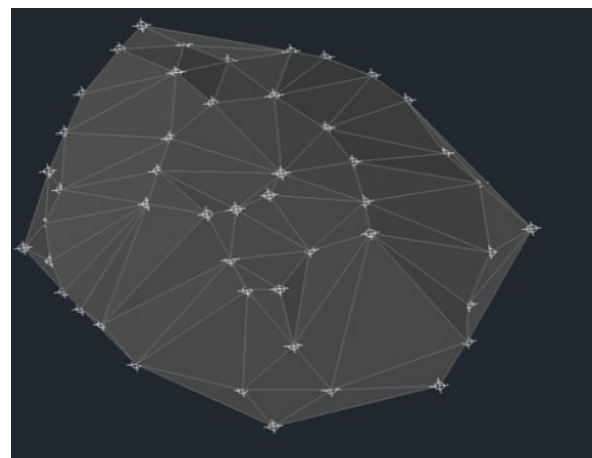


Fig. 3. Located area of crushed stone storage

As a result of the calculation, the storage volume is 793.91 m<sup>3</sup>.

One of the modern methods of determining the volumes of crushed stone compositions is photogrammetric surveying.

To create the surface of the crushed stone barrier, the barrier was photographed from all sides using a hand-held 3D laser scanner, *AlphaGEO SLAM R100*.

*SLAM R100* is a portable real-time 3D reconstruction device developed by *AlphaGEO*, which integrates a LiDAR module, a high-precision inertial navigation module, and high-performance computer modules. Thanks to the integrated system and simple management, built-in *AlphaGEO Multi-SLAM* reconstruction algorithm, the laser scanner can be used to directly acquire point clouds in true colors and create 3D models.

In the *Agisoft Metashape* software, modelling was performed using the built-in optimiser of the positions of the shooting cameras in space. One hundred and fifty-four photos taken around the warehouse were used for modelling. Figure 4 shows the location of the removal positions and the constructed cloud of points that form the storage.

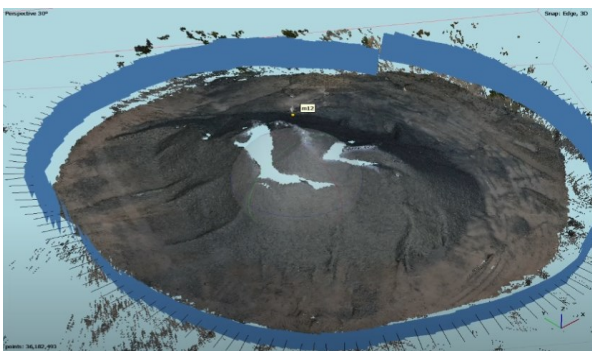


Fig.4. Dense cloud of points and positions of photographing centres

The next stage was creating a digital model of the height and contouring of the barrier according to the visual contour to automatically calculate the volume of the dam above the contour to be created. Automatic calculation determines the volume in and above the contour line drawn on the digital model (Fig. 4.).

As a result of the calculation, the storage volume is 794,24 m<sup>3</sup>.

Figure 5 shows the results of measuring the volume of crushed stone storage with fractions 24-40 mm by different methods.

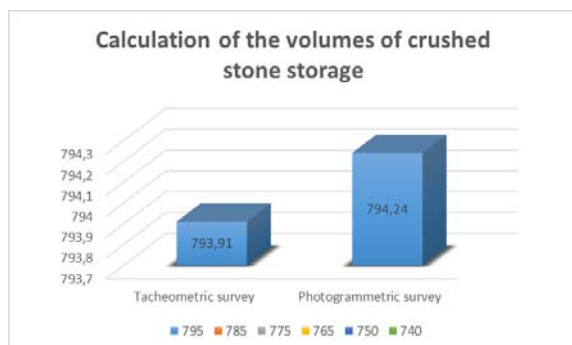


Fig.5 The results of measuring the volume of crushed stone storage

## Results and discussion

It was determined that tacheometric surveying has been well established over a long period of its use. However, determining the coordinates of points with the help of laser scanners has gained popularity and accuracy for performing any measurements that will provide the necessary conditions and accuracy.

In modern conditions, effectively controlling the volumes of crushed stone raw materials in the warehouse of finished products is a key element of optimising production processes and resource management. Increasing competition, requirements for product quality, and the need for efficient use of resources all make the issue of accurate control of the volumes of crushed raw materials urgent to ensure the stable operation of the mining enterprise. Two measuring methods were used to calculate the volume of crushed stone products: total station and photogrammetric.

## Conclusion

The measurements by the two methods showed that the volumes were almost the same, and the difference was 0.04%, which completely met the requirements of the survey for determining the volumes of crushed stone warehouses. It was determined that the measurement accuracy was ensured by high-quality surveying for each method. Each method can be used at mining enterprises that extract crushed stone.

## References

- Armands, C., Pukite, V., Ilona, R., Giedrius, B., Ozolina, S. (2020). Practical application of surveying methods for determination of volume quarry mining. *Baltic Surveying* 13:8-14. <https://doi.org/10.22616/j.balticsurveying.2020.vol13.001>
- Bozhyk, D., Sokur, M., Biletskyi, V. (2022). Determining the rational operating parameters for granite crushing to obtain cubiform crushed stone. Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, 18-24. <https://doi.org/10.33271/mining16.03.018>
- Cherniaiev, O., Anisimov, O., Saik, P., Lozynskiy, V., Adamchuk, A. (2023). Influence of mineral raw material processing on the qualitative and quantitative indicators of crushed stone production. Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, 69-86. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/74.069>
- Fomychov, V., Mamaikin, O., Demchenko, Y., Prykhorchuk, O., Jarosz, J. (2018). Analysis of the efficiency of geomechanical model of mine working based on computational and field studies. *Mining of Mineral Deposits*, 12(4), 46–55. <https://doi.org/10.15407/mining12.04.046>
- Kovanič, L., Pet'ovský, P., Topitzer, B., Blišťan, P. (2024). Spatial Analysis of Point Clouds Obtained by SfM Photogrammetry and the TLS Method—Study in Quarry Environment Special Issue Advances in the Evolution of the Geomorphological Landscape of Urbanized Areas <https://doi.org/10.3390/land13050614>
- Kunytska, M., Lunov, A., Panasiuk, A., Iskov, S., Shlapak, V. (2023). Digital simulation of open-pit mining organization system. *GEOMATE Journal*. Vol.25(109), pp.197–204. <https://geomatejournal.com/geomate/article/view/4064>

Levytsky, V., Tolkach, O. (2017). Research of environmentally-friendly utilization methods of the crushed stone waste on granite quarries. *The Journal of Zhytomyr State Technological University Series Engineering* 1(2(80)):173-180.  
[https://doi.org/10.26642/tn-2017-2\(80\)-173-180](https://doi.org/10.26642/tn-2017-2(80)-173-180)

Mantey, S.; Aduah, M.S. (2021). Comparative Analysis of Stockpile Volume Estimation using UAV and GPS Techniques. *Ghana Min. J.* 21, 1–10.  
<https://doi.org/10.4314/gm.v21i1.1>

Mykhailov, V. (2024). Development trends of the mining industry of Ukraine in the global context. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv Geology* 1(1 (104)):55-62.  
<https://doi.org/10.17721/1728-2713.104.07>

Saik, P., Cherniaiev, O., Anisimov, O., Dychkovskiy, R., Adamchuk, A. (2023). Mining of non-metallic mineral deposits in the context of Ukraine's reconstruction in the war and post-war periods. *Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine*, 91-102.  
<https://doi.org/10.33271/mining17.04.091>

## NATURAL RESOURCE MANAGEMENT AND ENVIRONMENTAL PROTECTION IN MINING AND PROCESSING OF MINERALS

Vasil Lyashenko<sup>1</sup>, Tamara Dudar<sup>2</sup>, Viktor Stus<sup>3</sup>, Tatiana Oliynik<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Ukrainian Research and Design Institute of Industrial Technology, 52204, Zhovti Vody, Ukraine, e-mail: vilyashenko2017@gmail.com

<sup>2</sup>National Aviation University 03058, Kyiv, Ukraine, e-mail: dudar@nau.edu.ua

<sup>3</sup>Dnipro State Medical University 49044, Dnipro, Ukraine, e-mail: viktor.stus@gmail.com

<sup>4</sup>Kryvyi Rih National University, 50000, Kryvyi Rih, Ukraine, e-mail: taoliynik@gmail.com

**Abstract.** The article presents the main scientific and practical results during the creation of prerequisites for solving regional environmental challenges for balanced resource conservation during the extraction and processing of mineral resources. In particular, the properties of materials were investigated during the activation of industrial waste, such as binder (granulated blast furnace slag), inert aggregates (a product of the rumberling of substandard materials) and mixing water (mine water) during the manufacture and transportation of hardening mixtures to the place of their stacking. Technologies and technical means for transporting hardening backfill mixtures have been studied and an algorithm has been developed for calculating schemes for their pipeline transport into underground developed spaces containing 0.10-0.35 dispersed particles with a concentration of solid particles in water of 0.10-0.85 and a standard cone settlement of 10-13 cm. It has been proven that the optimal coarseness of waste, taking into account grinding, transportation and stacking of mixtures in man-made cavities, is in the range of 25–35 mm. At the same time, the optimal fineness of grinding additives to the binder is 50-60% of particles with a size of 0.074 mm. With the same amount of binder, the strength of the control samples, in which the fineness of grinding the additive was 88% of the coarseness class – 0.074 mm, is 5 times greater than the fineness of 50%. The application of methods of activation of the components of the hardening mixture increases their activity as a whole by 10-40%. The use of beneficiation waste processed in disintegrators increases the strength of the embedded mass by 25-30% or reduces the consumption of cement by 40-50% while maintaining the required strength characteristics. The use of beneficiation wastes as an inert aggregate in the foundation mixture allows them to be disposed of, which leads to a reduction in laying costs, a reduction in cost, environmental safety and labor protection, and mineral resources during ore mining and beneficiation. It is recommended to continue research and provide funds (at the expense of enterprises, local and central authorities) to minimize the negative effects on human health from exposure to heavy metals and environmental protection, taking into account the peculiarities of their combined impact on the population and workers of the mining and metallurgical industry. The so far rare experience of strengthening the radiation and social protection of the population of Zhovti Vody, Ukraine, which has been forced to live for more than 70 years in the zone of influence of uranium industry facilities, is presented.

**Keywords:** mineral resources, extraction and processing, separation and activation, ecology and resource conservation, efficiency

### УПРАВЛЕНИЕ НА ПРИРОДНИТЕ РЕСУРСИ И ОПАЗВАНЕ НА ОКОЛНАТА СРЕДА ПРИ ДОБИВА И ПРераБОТКАТА НА ПОЛЕЗНИ ИЗКОПАЕМИ

Василий Ляшенко<sup>1</sup>, Тамара Дудар<sup>2</sup>, Виктор Стус<sup>3</sup>, Татьяна Олейник<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Украински научно-изследователски и проектно-конструкторски институт за промишлени технологии,  
Жолти Води, Украйна

<sup>2</sup>Национален авиационен университет, Киев, Украйна

<sup>3</sup>Днепровски държавен медицински университет, Днепър, Украйна

<sup>4</sup>Криворожский национален университет, Кривой Рог, Украйна

**РЕЗЮМЕ:** Статията представя основните научни и практически резултати при създаването на предпоставки за решаване на регионалните екологични предизвикателства за балансирано опазване на ресурсите при добива и преработката на полезни изкопаеми. Свойствата на материали по време на активацията на промишлени отпадъци, като например свързващо вещество (гранулирана шлака от доменни пещи), инертни пълнители (продукт от пресяването на нестандартни материали) и вода за смесване (руднична вода) са изследвани в хода на производството и транспортирането на втвърдяващите се смеси до мястото на насипването им. Изследвани са технологиите и техническите средства за транспортиране на втвърдяващи се засипни смеси и е разработен алгоритъм за изчисляване на схеми за транспортирането им по тръбопровод в подземни изкопи, съдържащи 0,10-0,35 дисперсни частици с концентрация на твърди частици във вода 0,10-0,85 и стандартно конусно слягане от 10-13 cm. Доказва се, че оптималният размер на едра зърнистост на отпадъците, при отчитане на смилането, транспортирането и насипването на втвърдяващите се смеси в изкуствени кухини, е в диапазона 25–35 mm. В същото време оптималната ситност на частиците на добавките към свързващото вещество е 50-60% от частиците с размер 0,074 mm. При същото количество свързващо вещество, якостта на контролните проби, при които ситността на частиците на добавката е 88% от класа на едрата зърнистост – 0,074 mm, е 5 пъти по-голяма от фиността на частиците от 50%. Прилагането на методи за активация на компонентите на втвърдяващата смес повишава тяхната активност като цяло с 10-40%. Използването на отпадъци от обогатяването и насипването в дезинтегратори, увеличава якостта на масата на запълване с 25-30% или намалява разхода на цимент с 40-50%, като същевременно запазва необходимите якостни характеристики. Използването на отпадъци от обогатяването като инертни пълнители във втвърдяващата смес позволява тяхната утилизация, което води до намаляване на разходите за запълване, по-ниска себестойност, екологична безопасност и охрана на труда при добива и обогатяването на минерални суровини. Препоръчва се научните изследвания да продължат и да се осигурят средства (за сметка на предприятията, местните и централната власт) за опазване на околната среда и за минимизиране на негативните последици върху човешкото здраве от излагане на тежки метали и, като се вземат предвид особеностите на тяхното комбинирано въздействие върху населението и работниците от минната и металургичната промишленост. Представен е и засега не дотам богатият опит за засилване на радиационната и социалната защита на населението на Жолти Води, Украйна, което е принудено да живее повече от 70 години в зоната на въздействие от обекти на урановата промишленост.

**Ключови думи:** минерални ресурси, добив и преработка, сепариране и активиране, екология и опазване на ресурсите, ефективност

### Introduction

Currently, in developed mining countries of the world, 5-8% of all produced electricity is spent on mechanical methods of

mineral processing. Approximately 80% of this value is energy consumption for grinding. The main operation associated with the preparation of waste from mining and metallurgical production for use as a hardening mixture for filling the mined-



out space of mines is grinding and activation (Aben et al., 2019, Antonelli et al., 2020).

Therefore, increasing the efficiency of activation of the components of the hardening filling mixture using waste from mining and metallurgical production by grinding them and repairing them at filling complexes, as well as transporting them to the place of their placement, ensuring a reduction in the energy intensity of the technological process for preparing the hardening mixture and increasing environmental safety is an urgent task that requires urgent solutions (Beiyuan et al., 2017, Basarir et al., 2018).

Vibro-gravity transport installations deliver hardening mixtures to a distance significantly exceeding the height of the vertical stack. At the Wismut mine (Germany), the hardening mixture with the Budtsnilu cone slump of 8.0 cm was fed to a distance 3 times greater than the height of the vertical line of the filling pipeline.

The works of domestic and foreign scientists formulated the global problem of the accumulation of mining waste due to the lagging behind the possibilities of processing mineral raw materials from the possibilities of their mining (Chernov et al., 2001, Chetveryk et al., 2017).

This problem is characterised by the accumulation of processing tailings on the earth's surface and the alienation of significant areas of fertile land from secondary products. Scientific and practical results were obtained by the research on the development of hardening mixtures with reduced consumption of binder for laying the produced space of chambers and technology and recipes of hardening mixtures from tailings for filling maps of surface storage facilities (Franchuk et al., 2000, Dereviagina et al., 2019). The problem of searching for alternative and complex binders and inert aggregates based on non-traditional production waste is an important scientific, practical, and social task that requires an urgent solution.

This work is a continuation of research, the main scientific and practical results of which are most fully presented in the works with the participation of the authors (Radiation et al., 2015, Onika et al., 2020).

**Research Object.** The object of the research is technologies and technical means for the extraction and processing of mineral resources by recycling mining and metallurgical waste into underground mined-out spaces as components of hardening backfill mixtures, taking into account the technological processes of activating the binder and substandard inert filler during their manufacture and transportation to the place of placement.

**Purpose of the study.** The objective of the research is to create prerequisites for solving regional environmental challenges for balanced resource conservation during the extraction and processing of mineral resources. This will allow us to justify technologies and technical means for recycling mining and metallurgical waste into underground mined-out spaces as components of hardening backfill mixtures, taking into account the technological processes of activating the binder and substandard inert filler during their manufacture and transportation to the location of their placement.

The following tasks were set and solved for the study:

1. To perform mathematical and physical modeling, as well as to calculate the parameters of vibratory gravity transport of hardening backfill mixtures.

2. To recommend vibratory transport units to increase the activity of solid components (binder and inert filler) of the hardening backfill mixture.

3. To offer a new set of technical means for activating the binder (granulated blast furnace slag), inert fillers (screening product of substandard materials), and mixing water during the production and transportation of hardening backfill mixtures.

4. To show promising research for conducting scientific substantiation and development of preventive measures to minimise negative consequences on human health and the environment in the zone of influence of the mining and metallurgical industry.

**Research methods.** The analysis of literary sources, methods of theoretical research and generalisations was performed using the study of dynamics (in the resonance zone, the Volterra principle and the concept of the complex modulus of elasticity introduced by E. S. Sorokin were used), mathematical statistics, physical and mathematical modelling, calculations, laboratory and full-scale experimental studies, industrial tests in the conditions of operating enterprises using standard and new methods with the participation of the authors, by special programs, such as GIS K-MINE®, VENTSIM, etc. Their implementation, in particular with the help of GIS K-MINE®, showed positive results and contributes to the solution of applied issues during the development of reserves of mineral deposits (Rudko G.I., Netskiy O.V., et al., 2018). Dependencies were obtained on the basis of analytical, experimental studies and experience in the operation of installations for pipeline transport of hardening mixtures to mines (Rudko G.I., Lovinyukov V.I. 2015).

**Theory of the issue.** *Determination of the parameters of the horizontal section of the pipeline vibration gravity transport of hardening mixtures.* The pipeline is subjected to vibration action of alternating force, which reduces the resistance to transportation. The main parameters of the vibration delivery are: the length of transportation ( $L$ ), the height of the vertical pipeline ( $H$ ), the length of the sections ( $l_1$ ) and the location of the vibration exciter within the section ( $l_2$ ) (Figure 1).

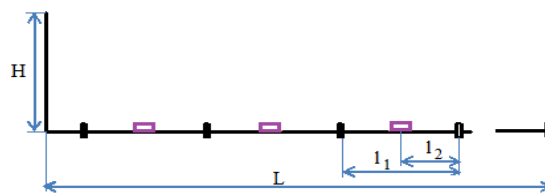


Fig. 1. Installation diagram of vibratory gravity transport (other designations in the text)

The effect of vibration ensures thixotropic liquefaction of the dispersed medium and movement of particles of the mixture in contact with the walls of the pipeline. The effect of vibration on the hardening backfill mixture is manifested by the acceleration of pipeline oscillations, which is characterised by the coefficient of the vibration transport mode

$$\Gamma = \frac{A \cdot \omega^2}{g}, \quad (1)$$

where  $A$  and  $\omega$  are the amplitude and frequency of oscillations, respectively, Hz and  $s^{-1}$  and  $g$  is the acceleration of gravity,  $m/s^2$ .

At  $\Gamma=0.6...1$ , a thixotropically liquefied wall layer is created and stratification of the hardening mixture is excluded (for a mixture located in a container with a free surface, for a pipeline,

the value of  $\Gamma$  can be chosen somewhat larger). Focusing on the value of  $\Gamma$  from expression (1), specifying the value of  $A$ , the frequency of forced vibrations  $\omega$  is found (for inertial vibration exciters with an asynchronous drive or motor-vibrators,  $\omega$  is usually selected and the amplitude  $A$  is determined). Effective vibration impact on the mixture is ensured by oscillating the pipeline with a minimum value of the vibration transport mode coefficient

$$\Gamma_{min} = \frac{\rho_r - \rho_o}{\rho_r}, \quad (2)$$

where  $\rho_r$ ,  $\rho_o$  are the densities of the aggregate particles and the dispersed medium, respectively,  $\text{kg/m}^3$ .

*Calculation of the process parameters of the pipeline.* The peculiarity of the movement of the hardening backfill mixture in the vibration gravity transport units is the presence of the main flow, in which the viscous-plastic properties of the mixture are preserved, and the near-wall layer, which is characterised by low viscosity. The stratification of the mixture is excluded at the speed of its longitudinal movement of 0.5-0.7 m/s - for mixtures with aggregate of up to 5.0 mm in size and 0.7-1.0 m/s - for mixtures with aggregate of 5.0-40.0 mm in size. The internal diameter of the pipeline (minimum) is determined from the expression:

$$D_{min} = 24,45 \cdot V_{cp} \cdot d_{cp} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{\tau_o}}, \quad (3)$$

where  $V_{cp}$  is the average transportation speed, m/s;  $d_{cp}$  is the average size of the transported material, mm;  $\rho$  is the density of the filling mixture,  $\text{kg/m}^3$ ;  $\tau_o$  is the ultimate shear stress of the mixture, Pa.

The pipeline capacity (the unit's capacity,  $\text{m}^3/\text{s}$ ) is determined from the expression:

$$Q = V \frac{\pi \cdot D^2}{4}, \quad (4)$$

where  $D$  is the internal diameter of the pipeline, m;  $V$  is the speed of movement of the mixture, m/s.

The most effective vibration effect on the hardening mixture occurs at a speed of its movement  $V=1.0...1.5$  m/s. Then the pipeline diameter is specified according to the expression is specified according to the expression:

$$D = 2 \cdot \sqrt{\frac{Q}{\pi \cdot V}} \geq 24,45 \cdot V \cdot d_{cp} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{\tau_o}}. \quad (5)$$

The specific pressure loss in the horizontal section of the pipeline is determined from the expression:

$$\Delta p = \frac{\frac{158,73}{D^3} + \frac{4\tau'_o}{D \cdot \eta_1}}{\frac{6}{\eta} + \frac{1}{\eta_1}}, \text{ Pa/m} \quad (6)$$

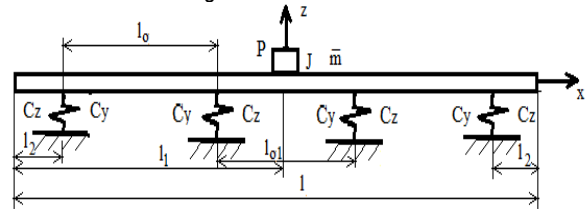
where  $\tau'_o$  is the shear stress of the wall layer, Pa;  $\eta = 0,1 \cdot \sqrt{\tau_o}$  is the viscosity of the filling mixture, Pa/s;  $\eta_1 = 0,1 \cdot \sqrt{\tau'_o}$ , is the viscosity of the thixotropically liquefied wall layer, Pa\*s:

The maximum range of supply of the hardening mixture by the installation is determined from the expression:

$$L = \frac{p_c}{\Delta p}. \quad (7)$$

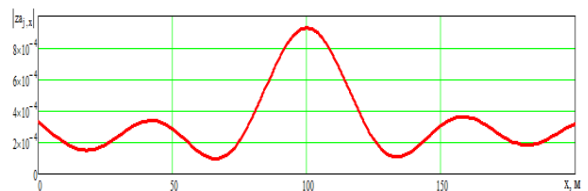
*Dynamic parameters of the pipeline section.* To ensure effective vibration impact on the hardening backfill mixture, it is

necessary to provide the horizontal section of the pipeline in the transverse direction with vibration parameters that ensure the required vibration displacement coefficient. For this purpose, the horizontal pipeline section is divided into a number of sections driven by a separate vibration exciter. The length of the pipeline section  $l$ , serviced by one locally installed vibration exciter, is selected in such a manner that the transverse vibrations of the pipe along its entire length are within the limits of  $\Gamma=0.6...1.0$ . Each section is installed on a number of elastic supports; under the influence of the vibration exciter, the pipe with the filler (hardening mixture) performs bending vibrations in the horizontal and vertical planes. The calculation scheme of the section is shown in Figure 2.



**Fig.2. Scheme for determining bending vibrations of a horizontal pipeline section:**  $l$  is the transportation length,  $m$ ;  $l_o$ ,  $l_1$ ,  $l_2$  are the distance between the vibration exciter supports, the length of the sections between the vibration exciters, and the length to the vibration exciter location within the section, respectively,  $m$ ;  $\bar{m}$  is the distributed mass of the section,  $\text{kg/m}$ ;  $P$  is the disturbing force of the motor-vibrator,  $N$ ;  $J$  is the moment of inertia of the section,  $\text{m}^4$ ;  $x$ ,  $z$  are the horizontal and vertical coordinates of the section, respectively,  $m$ ;  $C_z$ ,  $C_y$ , are the rigidity of the elastic support along axes  $z$  and  $y$ , respectively,  $N/m$ .

When the vibration exciter is located in the center, the section oscillations will be symmetrical, and only oscillations with odd harmonics will be excited. The general picture of oscillations of a section of sufficiently long length (when its bending oscillations appear) taking into account seven harmonics is shown in Figure 3.



**Fig. 3. Bending the pipe along the length of the section**

As follows from the graph, in the steady state, the greatest amplitude of deviation occurs in the middle of the pipe, and the amplitude of oscillations decreases towards the periphery.

*Calculation of elastic support parameters.* The total rigidity of the support shock absorbers is determined based on the gravity of the pipeline with the process load. Gravity of the pipeline:

$$P_{TP} = g \cdot (l \cdot \bar{m} + m_B), \quad (8)$$

where  $l$  is the transportation length,  $m$ ;  $m_B$  is the motor-vibrator mass,  $N$ ;  $\bar{m}$  is the distributed mass of the section,  $N$ , which is determined from the expression:

$$\bar{m} = \rho_M \frac{\pi \cdot (D^2 - d^2)}{4} + \rho_C \frac{\pi \cdot d^2}{4}, \text{ kg/m}, \quad (9)$$

$\rho_M, \rho_C$  – respectively, the density of the pipe material and the hardening filler,  $\text{kg/m}^3$ ;  $E$  – the modulus of elasticity of the pipe material, Pa;  $a$  – “natural velocity of the section”,  $\text{cm/s}$ :

$$a = \sqrt{\frac{EJ}{m}}, \text{ m}^2/\text{s}; \quad (10)$$

$\beta$  – parameter characterising elastic supports:

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{Cp}{E \cdot J}}, 1/\text{m}. \quad (11)$$

$Cp$  – linear rigidity of elastic foundation, equal:

$$Cp = \frac{n \cdot Cz}{l}, \quad (12)$$

$Cz$  – rigidity of elastic support,  $n$  – number of supports.

Rigidity of one shock absorber, taking into account their paired arrangement in the support:

$$C_{z1} = 2 \cdot n \cdot \frac{P_{\text{TP}}}{(1,4 \div 2) \cdot A(l_1)}. \quad (13)$$

Considering that it is possible to start the motor-vibrators in the absence of a process load, a higher value of the coefficient should be selected. The height of the elastic element is selected based on the permissible settlement  $[k_h]$ , or on the value of the permissible load  $[\sigma]$ . Usually (depending on the brand of rubber)  $[k_h] = 0.1 \dots 0.2$  is selected. Considering the intensity of vibrations and possible heating of the element, we take  $[k_h] = 0.1$ . As a result, we obtain

$$h = (2,4 \div 3)[k_h] \cdot A(l_1). \quad (14)$$

Massive rubber support elements are made cylindrical with a central ventilation hole. Knowing the elastic modulus for shock-absorbing rubber  $E_p$ , the diameter of the elastic element is determined as:

$$(D - d) = \sqrt{\frac{C_{z1} \cdot h}{\pi \cdot E_p}}. \quad (15)$$

Next, the dimensions of the elastic elements and the length of the section are adjusted, and it is checked that they do not go beyond the permissible limits.

## Materials and methods

The installation of vibration-gravity transport of hardening filling mixtures at the Shokpak-Kamyshevoye ore deposit (Republic of Kazakhstan) included a vertical riser and a horizontal pipeline (Figure 4). The supply of hardening filling mixtures was carried out in portions of up to 400  $\text{m}^3$ .



Fig. 4. Scheme of vibration-gravity pipeline transport of hardening mixtures: 1 – filling complex; 2 – well; 3 – cross-cut; 4 – man-made voids;  $H$  – depth of the filling hole to the earth’s surface, m;  $h_0$  – height of rise of hardening mixtures to man-made voids, m

The sectioned section of the pipeline was installed on rubber shock-absorbing supports, and sections of the pipeline 200 m long were equipped with vibration exciters. Under the influence of vibration, the mixture acquired a state of increased fluidity (Paul et al., 2018).

In the problem being solved, along with the required energy intensity, the required granular composition of the final product must be ensured. For example, the optimal size of waste is determined taking into account the costs of crushing, pipeline transport, and the density of their placement in waste chambers should be in the range of 25–35 mm. Thus, the grinding process must also be characterised by grinding efficiency. This parameter is selected as a controlling parameter. At the mines of the State Enterprise “SchidGZK”, Ukraine, the most widely used technological schemes for preparing a hardening backfill mixture on surface stationary backfill complexes are based on a binder made from granulated blast furnace slag and low-grade sand (Figure 5).

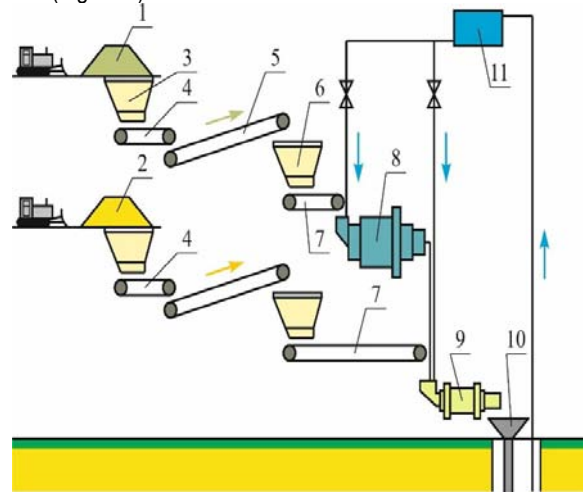


Fig. 5. Technological diagram of the filling complex: 1 – slag; 2 – sand; 3 – receiving bunker; 4 – feeder; 5 – conveyor; 6 – storage hopper; 7 – dispenser; 8 – ball mill; 9 – mixer; 10 – receiving funnel; 11 – container for mixing water

To separate lumps of clay and other impurities, the sand passes through a screening grid installed above the intermediate hopper. After dosing, the slag in a certain ratio with water enters a ball mill, and then in the form of a pulp into a mixer, where it is mixed with sand. Water is also supplied to the mixer to give the filling mixture the required mobility. The finished mixture enters the receiving funnel and is then transported through pipes in a gravity-pneumatic mode into the mined-out space.

At the enterprises of Tselinny Mining and Chemical Combine JSC and TsGKH JSC (Republic of Kazakhstan), vibration, mechanical and electrochemical activation devices were used to obtain a hardening backfill mixture with a strength of 0.2–1.2 MPa.

Increased activity was achieved through vibration activation of inert materials, mechanical activation of the binder components of the mixture during its transportation, and electrochemical activation of water. The activation efficiency was determined indirectly by the ratio of binders.

Activity equivalent: the amount of activated binder material from waste, equivalent in binder properties to cement, was determined by the rational ratio of binder materials (Poturaev et al. 1989). Mechanical activation of binding materials is carried out in a ball mill with central unloading CBM 3200x4500

(Ukraine). This mill is designed for crushing and fine grinding of ferrous, non-ferrous, and rare metal ores, granulated blast furnace slag, limestone, dolomite, and other materials. It has a productivity of 42–121 tons per hour, with a relatively low weight of 160 tons (Table 1).

Table 1. Characteristics of the ball mill CBM 3200x4500

The name of indicators	Indicators
Drum diameter, mm	3200
Drum length, mm	4500
Nominal volume, m <sup>3</sup>	32
Electric motor power, kW	800
Operating voltage, V	6000
Drum rotation frequency, s <sup>-1</sup>	0,33
Productivity, t/h	42–121
Weight with electrical equipment, t	160
Maximum mass of grinding media, t	61

The industrial use of a disintegrator in mining practice was first carried out at the Shokpak deposit (Northern Kazakhstan) (Ghorbani et al. 2016). For 10 years, the DU-65 industrial installation was in operation, making it possible to simulate the material processing mode, change rotors from 4 to 3 rows, and engines with a power of 200 to 250 kW. The material was activated by rotors with a protective layer. The installation was located in a separate building next to the backfill complex on three levels with a base area of 5–7 m.

The equivalent of 1 kg of standard M-400 cement was 4 kg of activated acid blast furnace tailings. Fast-acting devices are more effective, for example, disintegrator-activators type DU-65 (Disintegrator company, Estonia) and a vertical vibration mill type MVV-0.7 (Ukraine) (Figure 6).

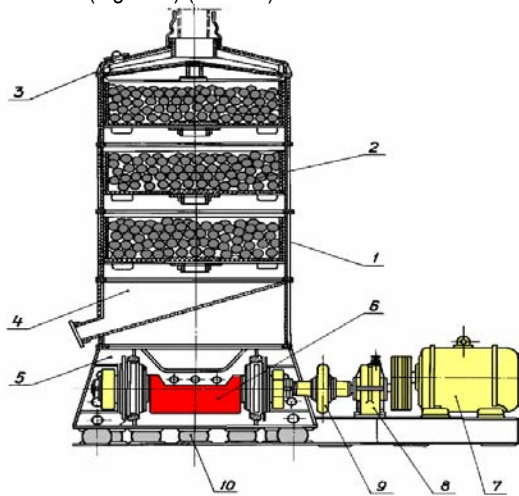


Fig. 6. Vertical vibration mill MVV-0.7: 1 – housing, 2 – grinding chamber with grinding bodies; 3 – loading section, 4 – unloading section; 5 – drive section, 6 – unbalanced drive, 7 – electric motor; 8 – gear-synchroniser; 9 – elastic coupling; 10 – elastic supports

The DU-65 type disintegrator-activator provided productivity when crushing material with a density of 2–3 g/cm<sup>3</sup>, at rotor speeds of 12000 min<sup>-1</sup>–10 kg/h, the maximum initial particle size of the processed material was 2.5 mm, the maximum humidity of the crushed material was 2%. Activity equivalent is the amount of activated binder material from waste that is equivalent to cement in binder properties. It is determined by an indirect method based on the rational ratio of binding materials.

The feasibility of using the simplex planning method has been proven, which allows one to search for the optimum taking

into account several criteria. This leads to a slight increase in the number of experiments, because the movement towards the optimum in simplex planning occurs in a zigzag, and not along a gradient, as, for example, in the Box-Wilson method (Iordanov et al., 2020).

Mechanical activation of binding materials is carried out in grinders, for example, a ball mill with central unloading CBM 3200x4500 (Ukraine). However, the most effective are high-speed devices, for example, disintegrator-activators type DU-65 (Disintegrator company, Estonia) and a vertical vibration mill type MVV-0.7 (Ukraine) (Figure 7).

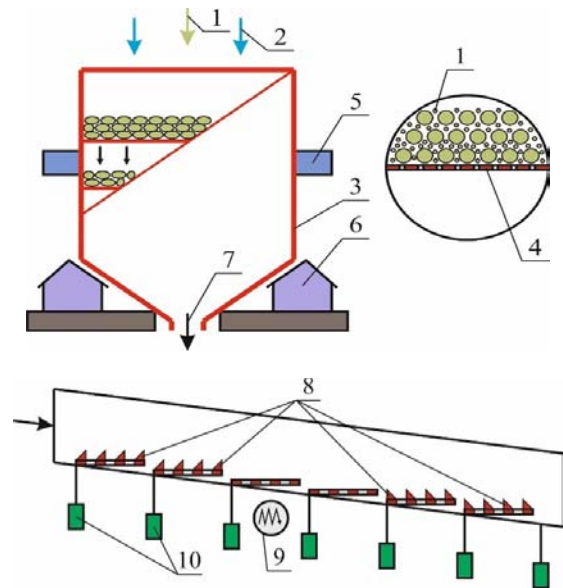


Fig. 7. Vibration activation of the components of hardening filling mixtures: a – vertical vibration mill: 1 – slag; 2 – water; 3 – chopper; 4 – sieve; 5 – vibrator; 6 – vibration dampers; 7 – activated slag; b – vibrating screen: 8 – teeth; 9 – vibrator; 10 – insulating supports

At the same time, the design becomes more complicated. For a hardening backfill mixture, the fineness of the slag grinding has a significant impact on the strength of the artificial mass. With the same consumption of binder material, the strength of the control samples, in which the fineness of grinding granulated blast furnace slag was 88% of the class - 0.074 mm, is 5 times greater than with a fineness of the formation of artificial masses.

## Results and discussion

The energy consumption for activation during the process of delivering mixtures in the installation was 0.15–0.22 kW/m<sup>3</sup> of the mixture when supplied over a distance of 2.0 km. The average speed of the mixture through the pipeline was 2.5–3.0 m/s. The mixture was transported without adding water with a cone settlement of 9 cm. In the presence of elastic supports and vibration exciters, a dynamic calculation of the structure is also required (Figure 8).

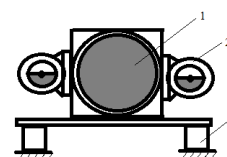


Fig. 8. Pipeline section 1 with vibration exciters 2 and shock absorbers 3

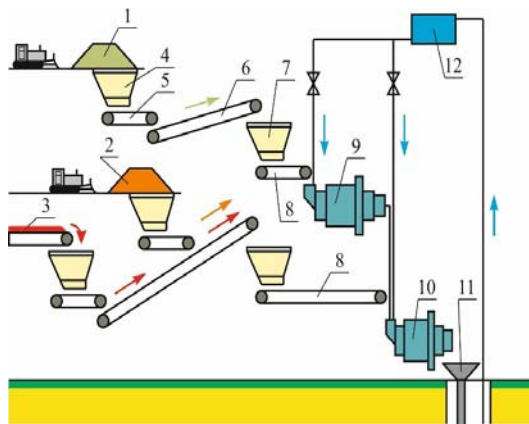


At the same consumption of binder, as a result of vibration, the strength of the backfill mass increased by 20-25%. The driving force of the exciter was 2-5 kN, the vibration amplitude of the pipeline was 0.5-2.0 mm, and the vibration frequency was 10-20 Hz. One pathogen affected a section of the pipeline 200-220 m long. Gravity and vibro-gravity pipeline transport of hardening filling mixtures are close in the calculation of technological parameters. The advantage and difference is that with vibrating gravity transport, the resistance to the movement of the mixture through the pipeline is reduced and the strength of the filling is increased.

Deviations for these reasons from the mode of preparation, transportation and placement of the mixture cause delamination in the pipeline (Kucha et al., 2013).

Research has established that heap leaching tailings or crushed rocks can be used as an additive to the hardening filler. Moreover, the strength of the artificial massif with the addition of heap leaching tailings is higher than with the use of crushed rocks at the same slag consumption per 1 m<sup>3</sup> of backfill. After leaching and washing, the tailings are transported to the stowage complex. At the same time, crushed rock is fed.

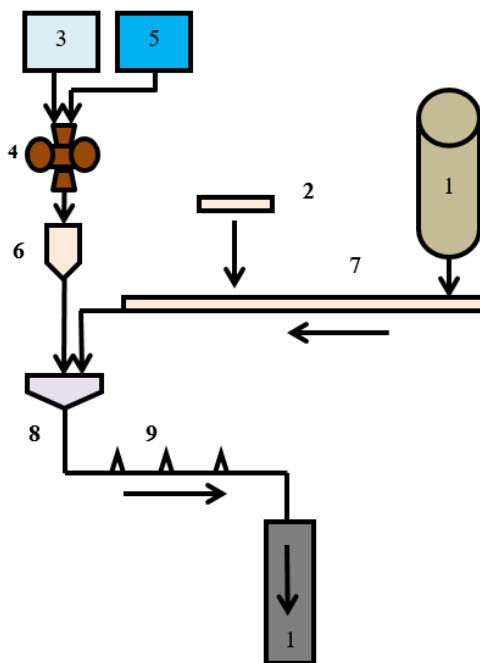
The dosage is carried out in a certain ratio with sand and enters the mixer, into which ground blast furnace slag and mixing water are supplied in the required quantity. Technical and economic calculations have shown that, taking into account the existing technology for production and delivery of backfill material to the place of laying, the most rational is the scheme with crushing rock waste and transporting it through pipelines to underground man-made voids. This scheme is characterised by ease of organisation and maintenance, high performance, and operational reliability (Figure 9).



**Fig.9. Technological diagram of the backfill complex for preparing a hardening backfill mixture using crushed rocks and heap leaching tailings: 1 – blast furnace slag; 2 – loams; 3 – breed with DSC; 4 – receiving bunker; 5 – feeder-dispenser; 6 – conveyor; 7 – consumable hopper; 8 – dispenser; 9, 10 – ball and rod mills, respectively; 11 – receiving funnel; 12 – water container**

To stabilise the strength of hardening filling mixtures based on slag binder, the authors determined the optimal fineness of its grinding, which for the conditions under consideration is 50 – 60%, containing particles (n, %) with a particle size of 0.074 mm. The maximum strength of the artificial massif using the vibration-gravity method of its transportation is achieved at a concentration of solid inert filler and binder  $K = 0.80-0.85$ . The most effective tool for activating the ingredients of a hardening mixture is a disintegrator, which provides an increase in the activity of binders by up to 40%.

Complex activation includes vibration activation on the vibrating screen, mechanical activation in the mill, electrochemical water treatment, and vibration of the hardening filling mixture during transportation (Figure 10).



**Fig. 10. Scheme of activation of the components of hardening mixtures during their production and transportation: 1 - cement bunker; 2 – vibrating screen of inert aggregates; 3 – blast furnace slag; 4 – disintegrator-activator DU-65 (Disintegrator company, Estonia); 5 – activated mixing water; 6 – vertical vibrating mill MVV-0.7 (Ukraine); 7 – conveyor; 8 – mixer; 9 – vibrators; 10 – man-made void (spent chamber)**

Activation in a disintegrator provided an increase in strength 25–30% greater than treatment in a ball mill. Yield up to 55% active grade in combination with a vibrating mill increased yield to 70%, allowing the activated local binder to compete with cement.

The disintegrator simultaneously crushed, dispersed and activated blast furnace acid metallurgical slag in order to reveal its astringent properties in the process of preparing hardening mixtures during the development of a deposit with the filling of technological voids. It is installed in the technological chain after the disintegrator. Due to the high oscillation frequency, the crushed material experiences one to two orders of magnitude more impacts per unit time than in ball mills. The research results for an initial material size of 0–10 mm are given below. Vibration parameters: vibration amplitude – 6.5 mm; the magnitude of the driving force is 190.8 kN. Mill productivity for the initial product is 9.0–10.0 t/h. The rational mode of the vibrating mill is determined by the interconnection of the modes that make up the technological chain of the filling complex. The results of grinding the material at different grinding sizes and the yield of the active fraction are given in Table 2.

The activation coefficient for the disintegrator-activator in comparison with the ball mill used at the deposits of the Joint Stock Company "Virgin Mining and Chemical Combine" (JSC "Tselinny Mining and Chemical Combine", Republic of Kazakhstan) is equal to 1.25.



**Table 2. Material grinding results**

Grinding stage	Residue on the sieve, % at grinding coarseness, mm									Active fraction
	1,60	1,00	0,63	0,40	0,315	0,20	0,10	0,10	0,074	
I	8,69	3,81	3,10	2,35	1,16	1,84	1,27	3,23	3,90	70,65
II	0,77	1,50	2,53	3,05	2,15	3,67	2,05	2,05	6,79	71,58
III	0,26	0,82	1,32	2,10	1,85	3,63	2,11	2,11	6,28	75,58

The MVV-0.7 vertical vibratory mill for grinding granulated slag is used in the technological chain after the disintegrator. In it, the crushed material experiences one to two orders of magnitude more impacts per unit time than in ball mills.

The vibration amplitude of the mill is 6.5 mm, and the magnitude of the driving force is 190.0 kN. Impact loading of the crushed material in this mill with minimal abrasion allows for deep activation, which leads to an increase in the period the material remains in the active state (Lysychenko et al., 2011, Lyashenko, et al., 2021). Disintegrators are very effective at finely grinding soft rocks. At the mining enterprises of Central Mining and Chemical Plant JSC, the Republic of Kazakhstan, devices for vibration, mechanical and electrochemical activation of mine water are used to obtain a hardening backfill mixture with a strength of 0.2–1.2 MPa using local materials.

When producing a low-strength filler, it is necessary to ensure fine grinding, destruction of loosely bound pieces of filler

and a stable transportation mode. This is carried out by vibration activation of inert materials, mechanical activation of binders before mixing, vibration activation of the hardening filling mixture during its transportation, and electrochemical activation of water.

It is advisable to carry out vibration activation of the hardening filling mixture during its transportation through pipelines. The rational mode of the vibrating mill is determined by the interconnection of the modes that make up the technological chain of the filling complex (Mac Carthy et al., 2016, Lyashenko, et al., 2022). Vibration activation of inert fillers during screening is possible in the case when stress concentrations are created in a piece of material sufficient for its destruction. The activation efficiency is determined by an indirect method based on the rational ratio of binders (Table 3).

It is advisable to carry out vibration activation of the hardening filling mixture during its transportation through pipelines. The rational mode of the vibrating mill is determined by the interconnection of the modes that make up the technological chain of the filling complex (Mac Carthy et al., 2016, Lyashenko, et al., 2022). The formula for determining the activation coefficient, for example, of a disintegrator is:

$$K_a = 1 + \frac{\mathcal{A}_m - \mathcal{A}_{dy}}{\mathcal{A}_m}, \tag{16}$$

where  $\mathcal{A}_m, \mathcal{A}_{dy}$  – are the equivalent of the activity of the material during grinding in mills and a disintegrator, respectively.

**Table 3. Slag activity indicators**

Mining enterprises	Activation devices	Binders, kg/m <sup>3</sup>		Water, l/m <sup>3</sup>	Filler, kg/m <sup>3</sup>	Activity equivalent
		slag	activator			
Pervomaisky GOK LLC (Ukraine)	Mill	400	Plaster 20	320	Sand 1200	20
PJSC "Zaporozhye Iron Ore Plant" (Ukraine)	Mill	400	Cement 50	380	Sand 1270	8
JSC "TsGKhK" (Republic of Kazakhstan)	Mill	400	Cement 50	360	PGS+breed 1350	8
	Disintegrator DU-65	190–220	Cement 60	380	Sand 1360	6.6–10.0
		220–300	Cement 30	380	Sand 1350	4.0–4.6

Note: ASG is a sand-gravel mixture

In comparison with the ball mill used at the uranium deposits of JSC Central Mining and Chemical Plant, this coefficient according to formula (16) is equal to:

$$K_a^{dy} = 1 + \frac{8 - 6}{8} = 1,25.$$

**Implementation results.** The amount of costs for environmentally friendly technology depends on the achieved preparation and transportation of hardening filling mixtures; they can be recommended for mining enterprises in developed mining countries of the world. The rational mode of the vibrating mill is determined by the interconnection of the modes that make up the technological chain of the filling complex. The use of vibration, mechanical and electrical activation of the components of the hardening backfill mixture at mining enterprises leads to an increase in the activity of binders and substandard materials by up to 10–40% for each apparatus (Naduty et al., 2012, Reiter et al., 2014). The authors proposed and implemented new technological schemes of backfill complexes for the disposal of waste from mining and metallurgical production into the underground goaf as components of hardening backfill mixtures, which gave positive results in the underground development of ore deposits of complex structure in Ukraine, Northern Kazakhstan, Germany,

and other developed mining countries (Serdyuk et al., 2011, Rysbekov et al., 2019).

**Effectiveness of developments.** And finally, based on the research carried out by the authors, a theoretical generalisation was carried out and a solution was offered to the scientific problem of developing the theory of interaction of grinding bodies in the grinding chambers of mills and increasing the efficiency of equipment for fine grinding of rocks, which is of great importance for the mining industry (Stupnik et al., 2022, Zelinsky et al., 2022). Prerequisites are also being created for solving regional environmental challenges for balanced resource conservation during the extraction and processing of mineral resources (Sotskov et al., 2019).

The efficiency of choosing parameters and areas of application of nature- and resource-saving technologies for underground mining of ore deposits based on process intensification is carried out according to the criterion of reduced profit, taking into account the preservation of the earth's surface, as well as the damage caused (or prevented) (economic consequences) to the environment and the costs of protecting the population, living in the zone of influence of mining enterprises (mining and processing), according to the Golik-

Lyashenko analytical model (Serdyuk et al., 2011, Report et al., 2023).

The analytical model consists of two blocks: geomechanical and economic. The model is built on the basis of the results of many years of research on conducting a complex of research works on the underground development of complex ore deposits in energetically disturbed massifs (Stupnik et al., 2018, Stupnik et al., 2022). The model provides basic calculation formulae for substantiating the safe and effective parameters of the chambers, taking into account the stability of their outcrops (Table 4).

**Table 4.** Safe parameters of chambers for ore deposits

Name of parameters	Calculation formulae
1. Equivalent spans at outcrops, m:	
correct shape;	$L_{\text{ЭКВ}} = \frac{a \cdot B}{\sqrt{a^2 + B^2}}$
irregular shape	$L_{\text{ЭКВ}} = \frac{2,5 \cdot S}{P_0}$
2. Outcrop stability criterion, m	$L_{\text{ЭКВ}} = L_{\text{ЭДОП}} = \frac{L_{\text{ЭО}}}{1,1}$
3. Stable spans, m:	
horizontal	$L_{\text{Г.ЭКВ}} = \frac{a \cdot B}{\sqrt{a^2 + B^2}}$
vertical	$L_{\text{В.ЭКВ}} = \frac{a \cdot H}{\sqrt{a^2 + H^2}}$
4. Equivalent span ( $L_{\text{ЭО}}$ , m) taking into account the existence time of outcrops ( $t$ , months)	$L_{\text{ЭО}}^2 \cdot t = \text{const} = A$
5. Equivalent spans for laying, m	
horizontal;	$L_{\text{Г.ЭКВ}} = \sqrt{\frac{2\sigma_{\text{ИЗ}} \cdot h_{\text{СЛ}}}{\gamma_3 \cdot K_3}}$
vertical	$L_{\text{В.ЭКВ}} = \frac{2C_M}{\gamma_3 \cdot K_3} \text{ctg} \left( 45^\circ + \frac{\rho}{2} \right)$
6. Stability of outcrops, m:	
length ( $a$ );	$a = \frac{L_{\text{Г.ЭКВ}} \cdot b}{\sqrt{b^2 + L_{\text{Г.ЭКВ}}^2}}$
width ( $b$ );	$b = \frac{L_{\text{Г.ЭКВ}}^2 \cdot a}{\sqrt{a^2 + L_{\text{Г.ЭКВ}}^2}}$
height ( $H$ )	$H = \frac{L_{\text{Г.ЭКВ}} \cdot a}{\sqrt{a^2 + L_{\text{Г.ЭКВ}}^2}}$

**Note.** The formulae indicate:  $S$  и  $P_0$  – area and perimeter of the outcrop,  $m^2$  and  $m$ , respectively;  $A$  is a constant value, the value of which depends on the properties of the rock mass and is determined from experience, units (for complex-structured ore deposits of the State Enterprise SE “SkhidGZK”, Ukraine in energy-disturbed massifs, the value  $A$  varies from 26800 (highly fractured massif) to 220000 (weakly fractured massif) with horizontal when the massif is exposed and from 75000 (highly fractured massif) to 1060000 (weakly fractured massif) – when hanging wall rocks are exposed);  $\sigma_{\text{ИЗ}}$  – is the bending strength of the fill,  $t/m^2$ ;  $h_{\text{СЛ}}$  – thickness of the lower monolithic layer of the fill (in calculations it was assumed  $h_{\text{СЛ}} = 4$  m);  $\gamma_3$  – filling density,  $t/m^3$ ;  $K_3$  – safety factor (in calculations it is assumed  $K_3 = 3$ );  $C_M$  – coefficients of adhesion between the backfill and ore,  $t/m^2$ ;  $\rho$  – angle of internal friction (in calculations it was assumed  $\rho = 32^\circ$ ).

For the safety of mining operations in the zone of influence of the voids of the spent chambers, the following is performed:

- forecast of the stressed-strained state (STS) of the mountain massif and assessment of the conditions for the dynamic manifestation of mountain pressure;
- organisation of the system of geomechanical monitoring of the VAT of the mountain massif and the stability of open chambers;
- equipping mines with equipment and devices for safe operation of mines;
- training of mine staff for monitoring and control of VAT of the mountain massif.

The economic block of the analytical model takes into account the costs of protecting the population (including costs of environmental protection, rehabilitation of polluted and disturbed areas, human health, etc.) living in the zone of influence of mountain objects:

$$P = \sum_{i=1}^n [(T_{dr} - S_{dr} \pm (D + Z_n))] \frac{1}{1+E^t-1} \cong \text{max}, \quad (17)$$

where  $P$  is profit from obtaining final products from metal-containing ores, money. unit;  $T_{dr}$  – total extracted value of final products from metal-bearing ores, UAH. unit;  $S_{dr}$  – total costs of mining and obtaining final products, money. unit;  $D$  – total damages (economic consequences) caused (–) to the environment or preventing its pollution (+) taking into account the costs of protecting the population living in the zone of influence of mining enterprises ( $Z_n$ ), gros. unit;  $E$  is the cost and profit discount factor in time  $t$  of the application of the evaluated technology, fractions of units.

A distinctive feature of the proposed model is the accounting of costs for the protection of the population living in the zone of influence of mining enterprises. Taking into account the national importance of the extraction of uranium raw materials, the government of Ukraine adopted a number of special resolutions aimed at strengthening radiation and social protection of the population with a total budget funding of over UAH 200 million. The main scientific and practical results of the mentioned accounting are most fully explained on the example of the city of Zhovti Vody, Ukraine (Serdyuk et al., 2011; Dudar, 2023).

In our opinion, the following new scientific and methodological provisions deserve attention:

It has been shown that when the crushed material is exposed to shock pulses with amplitudes greater than 250 and durations less than 0.01 s, the walls of cracks contained in particles can be considered as thin homogeneous plates with elastic and dissipative properties, while the crack wall motion is described by the Lagrange equation of the second kind for a system with one degree of freedom.

It has been established that the use of the developed UVT design allows: to reduce the energy intensity of transportation to 0.25–0.30 kW h per 1 m<sup>3</sup> of mixture; to increase the length of the pipeline section to 150–200 m, productivity by 1.8–2.0 times, and the strength of the artificial massif by 20–25%; to ensure reliable delivery of mixtures with a standard cone slump of 10–13 cm, containing 0.10–0.35 dispersed particles by weight and having a solid concentration of  $K = 0.80$ – $0.85$ , over a distance 20 times greater than the filling height of the vertical column.

It was determined that the rational solid concentration in the hardening filling mixture is 0.80–0.85, vibratory gravity transport eliminates stratification of the mixture during its transportation, and allows to increase the strength of the artificial massif by 20–25%. It is substantiated that a decrease in the frequency of forced oscillations of motor-vibrators with a constant vibration displacement coefficient  $\Gamma$  leads to an

increase in the length of the section served by one (pair of) vibration exciter (an increase from 150 to 200 m with a decrease in frequency from 150 to 100 rad/s). The efficiency of the impact of elliptical oscillations of the pipeline on reducing the resistance to movement of the hardening backfill mixture with an increase in the maximum length of the horizontal section of the pipeline compared to gravity transport is noted. The optimal size of the waste is established taking into account the costs of crushing, pipeline transport, and the density of their placement in the spent chambers and it is within 25-35 mm. To stabilise the strength of hardening backfill mixtures on a slag binder, the authors determined the optimal fineness of its grinding, which for the conditions under consideration is 50 - 60%, containing particles with a size of 0.074 mm.

## Conclusions

Mathematical and physical modeling was performed, and the parameters of the installation of vibratory gravity transport (VGT) of hardening backfill mixtures were calculated. Taking into account the obtained dependencies, the following were determined, performed in the order given below: the frequency and minimum amplitude of forced oscillations of the pipeline; the diameter of the pipeline and specific pressure losses; the delivery range; the length of the section and their number; the parameters of the elastic element of the support; their number; the magnitude of the forcing force of the vibration exciter; and the power of the drive (motor-vibrator).

Vibratory transport units are recommended to increase the activity of solid components (binder and inert filler) of the hardening backfill mixture. It is shown that when using sand-slag hardening backfill mixture, the rational slag consumption is about 400 kg/m<sup>3</sup>. When using crushed rock additives, slag consumption can be reduced to 300 kg/m<sup>3</sup>, and taking into account the use of GMZ tailings – to 200 kg/m<sup>3</sup>. The use of UVT increases the activity of solid components of the hardening backfill mixture by 10-15% and ensures the supply of the backfill mixture to a distance 15-20 times greater than the height of the vertical stack. In accordance with the calculation method, UVT was created and introduced into production at JSC *Tselinny Mining and Chemical Plant*, Northern Kazakhstan.

A new set of technical means is proposed for activating a binder (granulated blast furnace slag), inert fillers (screening product of substandard materials) and mixing water in the manufacture and transportation of hardening backfill mixtures. The use of vibration, mechanical and electrical activation of the components of the hardening backfill mixture at mining enterprises leads to an increase in the activity of substandard materials by up to 10–40% for each device. In particular, enrichment of inert materials on the *GV-1.2/3.2* vibrating screen (Ukraine) increases the activity by 15–20%. Activation of binders (granulated blast furnace slag) in the *MVV-0.7* vertical vibrating mill (Ukraine) and the *DU-65* disintegrator (Dezintegrator, Estonia) increases the activity of the binder by 20–25%, with the output of the active class of fractions with a size of 0.074 mm – by 55% versus 40% in ball mills.

It is proposed to continue prospective research and provide funds (at the expense of enterprises, local and central government bodies) for conducting scientific substantiation and developing preventive measures to minimise the negative consequences on human health from exposure to heavy metals and environmental protection, taking into account the

characteristics of their combined impact on the population and workers in the mining and metallurgical industry.

**Acknowledgements:** The authors express great appreciation for the value, constructive respect, and recommendations to specialists: Tarkhin Yu.M., Stepanova V.I., Dudchenko A.Kh., Tkachenko O.O. (DP "UkrNDPRIPROMTECHNOLOGIES", Ukraine), Pukhalsky V.M., Kuchi P.M., Kopanev A.V., Sinchuk V.V., Merkulov V.O., Kartavy V.P. (DP "SkhidGZK") and reviewers of statistics.

## REFERENCES

- Aben, E., Markenbayev, Zh., Khairullaev, N., Myrzakhmetov, S., & Aben, Kh. (2019). Study of change in the leaching solution activity after treatment with a cavitator. *Mining of Mineral Deposits*, 13(4), 114-120. <https://doi.org/10.33271/mining13.04.114>
- Antonelli, C., Feder, C. (2020). The new direction of technological change in the global economy. *Structural Change and Economic Dynamics*, No. 52, pp. 1–12.
- Basarir, H., Binv H., Fourie, A., Karrech, A. & Elchalakani, M. (2018). An adaptive neuro fuzzy inference system to model the uniaxial compressive strength of cemented hydraulic backfill // *Mining of Mineral Deposits*. No. 12(2). P. 1–12. <https://doi.org/10.15407/mining12.02.001>
- Beiyuan, J., Awad, Y.M., Beckers, F., Tsang, D.C., Ok, Y.S., Rinklebe, J. (2017). Mobility and phytoavailability of As and Pb in a contaminated soil using pine sawdust biochar under systematic change of redox conditions. *Chemosphere*, Vol. 178, pp. 110- 118. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2017.03.022.
- Mining and processing of uranium ores in Ukraine. Monograph. Under the general editorship of A.P. Chernova. – K.: *Adef – Ukraine*, 2001. – 238 p. (in Ukrainian).
- Chetveryyk, M., Bubnova, O., & Babiy, K. (2017). The rate of deformation development in the rock massif on the basis of surveying monitoring on the earth surface. *Mining of Mineral Deposits*, 11(1), 57-64. <https://doi.org/10.15407/mining11.01.057>
- Dereviahina, N., & Malanchuk, L.(2019). Analysis of operation parameters of partial backfilling in the context of selective coal mining // *Mining of Mineral Deposits*. No. 13(4). pp. 129–138. <https://doi.org/10.33271/mining13.04.129>
- Dudar, T.V. (2023). Uranium mining and milling sites as sources of technologically-enhanced naturally occurring radioactive materials. ISSN 1562-6016. *Problems of Atomic science and Technology*. Issue 3 (145). pp. 127-132. DOI 10.46813/2023-145-127 (in Ukrainian).
- Franchuk, V.P. Antsiferov, A.V.(2000). The use of the Volterra principle and the complex modulus of elasticity when taking into account inelastic resistances in oscillatory systems with significant asymmetric nonlinearity. *Science Bulletin of NSAU*. No. 2. pp. 30–32. (in Ukrainian).
- Onika, S.G., Rysbekov, K.B., Aben, E.K., & Bahmagambetova G.B. (2020). Leaching rate dependence on productive solution temperature. *Vestnik KazNRTU*, 142(6), 700-705. <https://doi.org/10.51301/vest.su.2020.v142.i6.122>.
- Paul A., Murthy, V. M.S.R., Prakash, A. K. (2018). Estimation of rock load in development workings of underground coal mines. A modified RMR approach. *Current Science*. Vol. 114 (10). pp.2167 – 2174.

- Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. (2015). Vienna: IAEA. –484 p.
- Vibration delivery complexes in ore deposit development technologies / [Poturaev, V.N., V.I., Poddubny, I.K. (1989) and others] ed. IN AND. *Belobrova - K.: Nauk. Dumka*, 167 p. (in Ukrainian).
- Ghorbani, Y., Franzidis, J.-P., Petersen, J. (2016). Heap Leaching Technology—Current State, Innovations, and Future Directions: A Review. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 37. (2), 73–119.
- Iordanov, I., Novikova, Yu., Simonova, Yu., Yefremov O., Podkopayev, Ye., & Korol, A.(2020). Experimental characteristics for deformation properties of backfill mass // *Mining of Mineral Deposits*. No. 14(3). pp. 119–127. <https://doi.org/10.33271/mining14.03.119>
- Kucha, P.M. Justification of the technology and parameters of underground mining operations during block leaching of uranium from solid ores / P.M. Kucha. "Sustainable development of industry and society": international. science and technology conf. (May 22-25, 2013). - Kryvyi Rih: DVNZ "KNU". – 2013, vol. 1,(pp. 26–27). (in Ukraine).
- Lysychenko, G.V., Kovach, V.E. (2011). The world experience of rehabilitation of uranium production // Collection. articles "Technogenic and ecological safety and civil protection". – Kremenchuk. - Vol. 6, pp. 4–12.
- Lyashenko, V., Khomenko, O., Chekushina, T., Dudar, T., Topolnij, F. (2021). Substantiation of efficiency and environmental safety of leaching metals from ore: ways of development and prospects. *Technology Audit and Production Reserves*, 3 (3 (59)), 19–26. doi: <http://doi.org/10.15587/2706-5448.2021.235288>.
- Lyashenko, V., Andreev, B., & Dudar, T. (2022). Substantiation of mining-technical and environmental safety of underground mining of complex-structure ore deposits. *Mining of Mineral Deposits*, 16(1), 43–51. <https://doi.org/10.33271/mining16.01.043>.
- Mac Carthy, J., Nosrati, A., Skinner, W., Addai-Mensah, J. (2016). Atmospheric acid leaching mechanisms and kinetics and rheological studies of a low grade saprolitic nickel laterite ore. *Hydrometallurgy*, Vol. 160, 26–37.
- Malanchuk, Z., Kornienko, V., Malanchuk, Ye., Soroka, V., & Vasylichuk, O. (2018). Modeling the formation of high metal concentration zones in man-made deposits. *Mining of Mineral Deposits*, 12(2), 76-84. <https://doi.org/10.15407/mining12.02.076>
- Naduty, V.P., Sukharev, V.V., Belyushin, D.V.(2012). Analysis of the impact interaction of lump rock mass with the working surfaces of machines and equipment // *Geotechnical mechanics: Sat. scientific tr. – Dnepropetrovsk: IGTM NAS of Ukraine*, Vol. 103, pp. 152–159. (in Ukrainian).
- Reiter, K., Heibach, O. (2014). 3–D geomechanical–numerical model of the contemporary crustal stress state in the Alberta Basin (Canada) // *Solid Earth*. No. 5, pp. 1123– 1149.
- Report on the state of nuclear and radiation safety in Ukraine in 2022//State Nuclear Regulatory Inspection of Ukraine, Kyiv, 2023, 88p.
- Rudko, G.I., Lovinyukov, V.I. (2015). National classification of reserves and resources in the context of the main classifications of the world. Nadrokoristuvannya in Ukraine. Investment prospects: Materials of the 2nd International Scientific and Practical Conference. Truskavets, pp. 82–91 (in Ukrainian).
- Rudko, G.I., Netskiy, O.V., Nazarenko, M.V. (2018). Geoinformation technologies for geological and economic assessment of genus of bark copalina (using GIS K-MINE®). *Geoinformatika*, 3 (67): 14–24 (in Ukrainian).
- Rysbekov, K., Huayang, D., Kalybekov, T., Sandybekov, M., Idrissov, K., Zhakypbek, Y., & Bakhmagambetova, G. (2019). Application features of the surface laser scanning technology when solving the main tasks of surveying support for reclamation // *Mining of Mineral Deposits*. – No. 13 (3). – pp. 40-48. <https://doi.org/10.33271/mining13.03.040>
- Serdyuk, A.M. Stus, V.P., Lyashenko, V.I. (2011).Ecology and livelihoods of the population in the industrial regions of Ukraine. *Dnipropetrovsk. Vidavnistvo "Thresholds"*, 486 p. (in Ukrainian).
- Sotskov, V., Dereviahina, N., & Malanchuk, L. (2019). Analysis of operation parameters of partial backfilling in the context of selective coal mining // *Mining of Mineral Deposits*. No. 13(4), pp. 129–138.
- Problems of discovery and preparation of ore deposits in the deep horizons of the mines of Kryvbas / M. I. Stupnik, M. B. Fedko, S. V.(2018). Pysmennyi and others. *Bulletin of the Kryvorizk National University: Coll. of science works – Kryvyi Rih*, – Issue 47, pp. 3–8. -DOI: 10.31721/2306-5451-2018-1-47-3-8. (in Ukrainian).
- Stupnik, M., Kalinichenko, O., Kalinichenko, V., Pysmennyi, S., & Morhun, O. (2018). Choice and substantiation of stable crown shapes in deep-level iron ore mining. *Mining of Mineral Deposits*, 12(4), 56-62. <https://doi.org/10.15407/mining12.04.056>
- Stupnik, M., Kalinichenko, V, Fedko, M., Pysmennyi, S., Kalinichenko, O., Pochtarev, A. (2022). Methodology enhancement for determining parameters of room systems when mining uranium ore in the SE “SkhidGZK” underground mines, Ukraine // *Mining of Mineral Deposits*. No. 16 (2), pp. 33–41. <https://doi.org/10.33271/mining16.02>
- Zelinsky, S.E. (2022). Radiation safety and environmental impact of uranium production in Ukraine. *Kropyvnytskyi, 60 p.* (in Ukrainian).



## COMPLEX POLYMETALLIC ORE BENEFICIATION INVESTIGATION

**Georgi Merazchiev<sup>1</sup>**, **Natasha Troshanova<sup>1</sup>**, **Nikolay Nestorov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>GEOTECHCOPPER LTD, Bulgaria, Sofia

<sup>2</sup>DIAL LTD, Bulgaria, Sofia-Buhovo, 1830, office@dial-ltd.com

**ABSTRACT.** The report presents the results obtained when determining the beneficiation of an ore sample from a vein quartz-polymetallic deposit of ours. The material composition of the ore from the technological sample was studied through chemical, phase and mineralogical analyses. The quantity of the main beneficial components – Pb, Zn, Mo, Au, and Ag – was determined and their mineral carriers, as well as the relationships between them, were established. The grinding of the ore (class – 0.08 mm) depending on the duration of the operation was determined. Given the complex nature of the ore and the relatively low contents of the useful components in it, a collective scheme of flotation was adopted as the most suitable for flotation testing with subsequent selective operations for extracting the useful components in individual products. The technological parameters of flotation were determined by open-cycle experiments. Technological indicators of the flotation process in the collective cycle have been achieved with closed-cycle experiments. Due to the high recovery of the valuable components, it was not necessary to carry out gravity extraction of gold and silver from the ore or from the tailings of collective flotation. Further separation of the collective concentrate goes through several successive cycles: Molybdenum flotation; Pyrite flotation; Lead flotation; Zinc flotation. Recommendations are made for further development of flotation research on the various types of ore from the deposit.

**Key words:** gold, silver, molybdenum, flotation, laboratory.

### ИЗСЛЕДВАНЕ НА ОБОГАТИМОСТТА НА КОМПЛЕКСНА ПОЛИМЕТАЛНА РУДА.

**Георги Меразчиев<sup>1</sup>**, **Наташа Трошанова<sup>1</sup>**, **Николай Несторов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>ГЕОТЕХКОПЕР ООД, България, София

<sup>2</sup>ДИАЛ ООД, България, София - Бухово, 1830

**РЕЗЮМЕ.** В доклада са показани резултатите, получени при определяне на обогатимостта на рудна проба от наше жилно кварц-полиметално находище. Вещественият състав на рудата от технологичната проба е изучен чрез химически, фазови и минераложки анализи. Определено е количеството на основните полезни компоненти – Pb, Zn, Mo, Au и Ag – и са установени както минералните им носители, така и взаимоотношенията между тях. Определено е смилането на рудата (клас – 0,08 mm) в зависимост от продължителността на операцията. Предвид комплексния характер на рудата и относително ниските съдържания на полезните компоненти в нея, като най-подходяща за флотационно тестване, е приета колективна схема на флотация с последващи селективни операции за извличане на полезните компоненти в самостоятелни продукти. Технологичните параметри на флотация са определени с опити в открит цикъл. Технологичните показатели на флотационния процес в колективния цикъл са постигнати с опити в затворен цикъл. Поради високото извличане на ценните компоненти, не се наложи провеждане на гравитационно извличане на злато и сребро от рудата или от отпадъка на колективна флотация. По-нататъшното разделяне на колективния концентрат преминава през няколко последователни цикъла: молибденова флотация; пиритна флотация; оловна флотация; цинкова флотация. Направени са препоръки за по-нататъшно развитие на флотационните изследвания върху различни типове руди от находището.

**Ключови думи:** злато, сребро, молибден, флотация, лабораторни.

### Въведение

Тенденцията за намаляване на съдържанието на полезни компоненти в обогатяваните и подлежащи на проучване полиметални руди налага да се търсят нови подходи за извличането им в едноименни концентрати.

В този доклад се разглежда подобен пример.

- ✓ Zn – 0,46%
- ✓ Mo – 0,084%
- ✓ Au – 1,01 g/t
- ✓ Ag – 114 g/t

Проведеният фазов анализ на злато и сребро показва следното разпределение:

Таблица 1. Фазово разпределение на злато и сребро

Фаза на присъствие	Разпределение, %	
	Au	Ag
Свободно	16,8	15,4
Цианируемо	49,5	11,1
В окисна обвивка	7,9	12,8
В сулфиди	7,9	35,6
Финодисперсно	17,8	25,2

### Изследване на обогатимостта на комплексна полиметална руда

#### Веществен състав на изследваната рудна проба

Доставената рудна технологична проба е подготвена и разработена по класическа схема за подготовка на рудни технологични проби за провеждане на лабораторни изследвания и флотационни тестове и доведена до едрина 3 – 0 mm. Чрез провеждане на химически и фазови анализи е определен вещественият ѝ състав. За установяване на минералното разнообразие са извършени макроснимки и микроскопски оптични наблюдения върху рудни късове и значителен брой аншлифи.

В резултат на тези анализи е установено, че в рудата се съдържат следните полезни компоненти:

- ✓ Pb – 0,39%

Цинкът е основно под формата на сфалерит – 91,2% отн, в неразтворими минерали са 5,4% отн, а в окисни минерали – 3,4% отн.

Оловото е разпространено основно под формата на галенит – 90,2% отн, а в неразтворими минерали са останалите 9,8% от него.

С оптични изследвания в отразена светлина е установено, че рудата от технологичната проба се

характеризира като полиметална злато-сребро-съдържаща с разнообразен минерален състав. Основните рудни минерали са:

- ✓ Първични – пирит, сфалерит, галенит, молибденит, оловно-бисмутови сулфосоли, халкопирит, самородно злато, магнетит;
- ✓ Вторични – ковелин.

Общото количество на рудните минерали в пробата е около 4 – 5%.

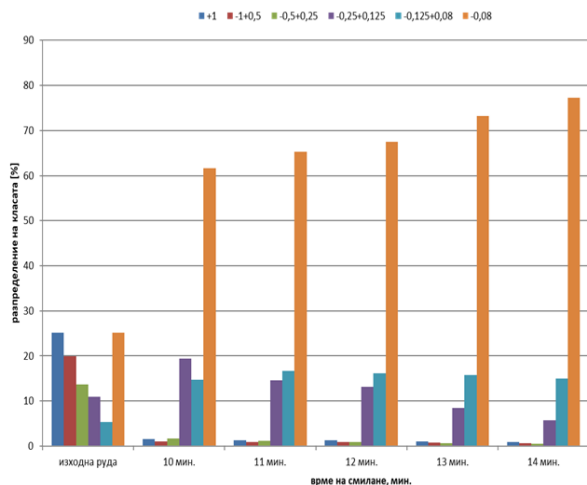
Златото в техноложката проба се наблюдава в собствена минерална форма – в самороден вид – с неправилна, овална капковидна форма. То прониква по пори, пукнатини и празнини в пирита и оловно-бисмутовата сулфосол, в които е наблюдавано. Микросондовите анализи показват, че то е умерено високопробно злато с пробност от 842 до 848.

Среброто не се установява при обикновените наблюдения. То се наблюдава с микросондови анализи като налично в самородното злато, в оловно-бисмутовите сулфосоли и в галенит.

Нерудни минерали – кварц, слюди, фелдшпати, калцит.

Преобладаващият минерал е кварцът, чието количество в разгледаните полирани препарати достига до 85%. Останалите нерудни минерали са слабо разпространени.

Химическите и минераложки анализи на смляна руда показват, че с увеличаване степента на смилане се повишава разкриването на минералите под формата на свободни зърна в едноименните класи.

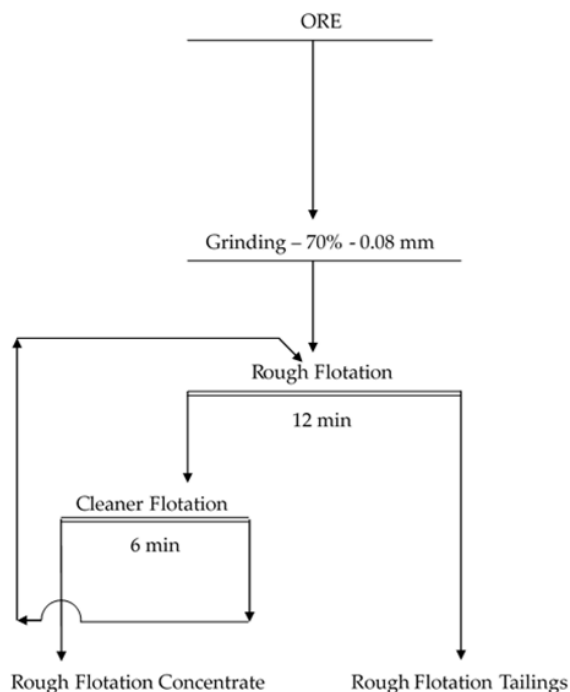


Фиг. 1. Определяне на оптимална степен на смилане

### Лабораторни тестове за изследване на обогатимостта на рудата

#### 1. Предварителни показатели на колективна флотация

Имайки предвид комплексният веществен състав на техноложката проба и относително ниските съдържания на почти всички полезни компоненти в нея, бе прието тя да се изследва на обогатимост по схемата на колективно-селективна флотация. Тази схема обхваща следните пет цикъла: колективна флотация, молибденова флотация, пиритна флотация, оловна флотация и цинкова флотация.



Фиг. 2. Затворен цикъл на колективна флотация

Съществено внимание е отделено за определяне влиянието на основните технологични параметри, влияещи върху технологичните показатели на колективна флотация – разходи на регулатор на средата ( $\text{NaCO}_3$ ), депресор на скалната маса ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ), активатор ( $\text{CuSO}_4$ ), събиратели и смеси от тях (керосин, К-изобутилов ксантогенат и аерофлот 238), както и продължителността на флотацията. За определяне на оптималната стойност на всеки параметър на технологичния режим на колективна флотация са извършени серии опити открит цикъл по метода на Зайдел-Гаус.

С установените оптимални параметри на технологичния режим по схемата, състояща се от основна колективна, контролна колективна и пречиствка на концентрата от основна флотация са извършени опити в затворен цикъл на колективна флотация от четири тегла (по 3 kg за тегло) за определяне на технологичните показатели на колективна флотация.

При създадените оптимални условия за флотация на сулфидите, добивът на получения концентрат е 6,93% и в него се съдържат 5,4% Pb; 6,5% Zn; 1% Mo; 0,5% Bi; 11,3 g/t Ag. Постигнатото извличане на тези компоненти в колективния концентрат е високо и е съответно: 94,2% за оловото, 96,4% за цинка; 81,7% за молибдена, 92,8% за бисмута, 98,9% за златото и 94,6% за среброто.

#### 2. Предварителни показатели на молибденова флотация

Селекцията на молибденита от колективния концентрат е осъществена с опити в открит цикъл по схемата, включваща предварително съгъстване на колективния концентрат и последователна агитация с  $\text{NaHS}$  – за депресиране на останалите сулфиди; водно стъкло – за депресия на нерудните минерали и керосин – за активиране на молибденита. Количествата им са съответно 7 kg/t; 1,75 kg/t и 0,035 kg/t колективен концентрат. Самата молибденова флотация включва

основна молибденова флотация и една пречистка на получения молибденов концентрат. По тази схема и режим на флотация в молибденовия концентрат от първа пречистка се съдържат 9,8% Мо, като извличането му от колективния концентрат е 69%.

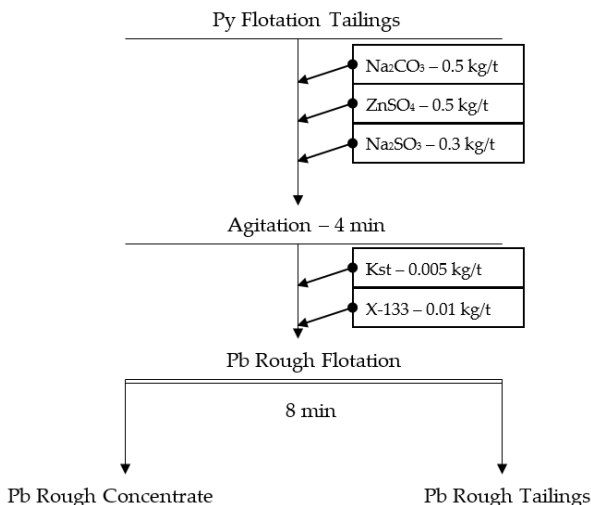
### 3. Предварителни показатели на пиритна флотация

В практиката на обогатяване на полиметални руди пиритът обикновено се отделя като краен отпадъчен продукт след получаването на оловен и цинков концентрат. Но в настоящия случай, поради високото му съдържание в колективния концентрат, се налага пиритът да се извлече от колективния концентрат веднага след отделянето на молибдена.

Пиритната флотация е извършена по схемата включваща: аерация, основна пиритна флотация и пречистна флотация на пиритния концентрат. Като реагенти са използвани ксантогенат и пенообразувател (X-133). По тази схема се получава пиритен концентрат от първа пречистка с добив – 26,3%, съдържащ 49,5% S, като извличането от отпадъка на молибденова флотация е 44,4%. В този концентрат се съдържат 11 g/t злато и 350 g/t сребро.

### 4. Предварителни показатели на оловна флотация

Поради намалялото количество на продукта захранващ този цикъл (отпадък от пиритна флотация) и обема на ползваните флотационни машини, се наложи да се ограничи броят на операциите в оловна флотация. Тествана е само една операция от оловния цикъл – основна оловна флотация.



Фиг. 3. Оловна флотация

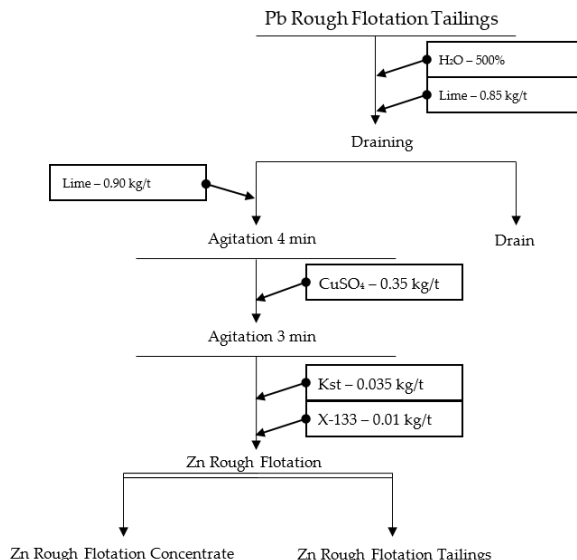
Основна оловна флотация е извършена по схема, в която отпадъкът от пиритна флотация се подлага на двукратно отмиване с вода: твърдо тъй както 10:1 и 30:1 за отделяне на адсорбираните реагенти от повърхността на минералите. След това продуктът се съгъства и подлага на последователна агитация с  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{ZnSO}_4$ , и  $\text{Na}_2\text{SO}_3$ .

Добивът на получения концентрат от основна оловна флотация е 54,5%. В него се съдържат: 13,2% Pb; 17,7% Zn; 1,26% Bi; 25,3 g/t Au и 3860 g/t Ag. Извличането на компонентите от отпадък пиритна флотация е съответно

82,3% на оловото, 88,9% на цинка, 76,2% на бисмута, 80,9% на златото и 80,7% на среброто.

### 5. Предварителни показатели на цинкова флотация

И в този цикъл, поради малкото количество на продукта, който го захранва (отпадък от оловна флотация), се наложи цинковата флотация на изследваната рудна техноложка проба да се тества само с една операция – основна цинкова флотация. Тя е осъществена по схема, в която отпадъкът от оловна флотация се съгъства и подлага на последователна агитация с вар и  $\text{CuSO}_4$ . След подаване на ксантогенат и пенообразувател (X-133) се извършва основна цинкова флотация.



Фиг. 4. Цинкова флотация

Полученият концентрат от основна цинкова флотация съдържа 20,1% Zn, а извличането му от отпадък от оловна флотация е 80,8%. В него се съдържат 30,4 g/t злато и 2890 g/t сребро.

### Изводи и препоръки

Изследваната рудна техноложка проба се характеризира, като полиметална злато-сребросъдържаща руда с разнообразен минерален състав. Над 90% от носителите на оловото и цинка са сулфидни минерали (галенит и сфалерит). Почти половината от златото е в цианируема фаза на присъствие, а по около 20% финодисно и свободно. Повече от 35% от среброто е свързано със сулфидите, една четвърт е финодисперсно, а около 15% е в свободна фаза на присъствие.

Колективната схема на флотация с последваща селекция на получения колективен концентрат е подходяща за обогатяването на този тип руда поради комплексния ѝ състав и относително ниските съдържания на полезни компоненти.

В цикъла на колективна флотация се получава колективен концентрат, в който се извличат от руда: 94,2% от оловото, 96,4% от цинка, 81,7% от молибдена, 98,9% от златото и 94,6% от среброто.

Поради ограниченото количество на изходен материал, при селектиране на отделни концентрати са проведени само тестове в отворен цикъл на флотация с цел определяне на възможностите за селекция на сулфидния колективен концентрат.

В молибденовия цикъл, полученият концентрат от първа пречистка съдържа 9,8% молибден при извличане от колективен концентрат 69%. По-нататъшното развитие на схемата на молибденова флотация, с осъществяване на допълнителен брой пречистки и на други операции, би довело до получаването на концентрат, съдържащ над 40% молибден.

В цикъла на пиритна флотация е получен пиритен концентрат, съдържащ 49,5% сяра, 11 g/t злато и 350 g/t сребро.

В цикъла на оловна флотация, от основна флотация е получен концентрат с 13,2% олово, 25,3 g/t злато и 3860 g/t

сребро. По-нататъшното развитие на оловна флотация също би довело до получаването на стандартни продукти.

Полученият концентрат от основна цинкова флотация съдържа 20,1% цинк, 30,4 g/t злато и 2890 g/t сребро.

За разработването на технология за обогатяване на изследваната руда и определяне на показателите при получаване на самостоятелни концентрати трябва да се проведат допълнителни детайлни лабораторни изследвания върху предоставената техноложка проба в необходимото количество.

## **Литература**

Зеленов, В. И. (1988). *Методика изследвания злато сребро съдържащите руд.*

Николаев, Гр. (1992). *Месторождения на полезни изкопаеми.*

## PECULIARITIES OF THE MAJOR GENETIC TYPES OF ECONOMICALLY IMPORTANT LEAD AND ZINC DEPOSITS

Mihail Petrov

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: misho\_mgu@abv.bg

**ABSTRACT.** Lead and zinc deposits have a complex nature and are the main source of the metals Pb and Zn, as well as of valuable accompanying components, such as Cu, Ag, Au, Cd, In, Sn, Sb, Bi, Se, Te, etc. Depending on the genetic type, the deposits differ significantly in size, ore bodies morphology, ore mineral and metal content, trace element type and concentrations, etc. This article focuses on the main characteristics and worldwide distribution of the major genetic types of sulphide and non-sulphide Pb-Zn deposits – sediment-hosted deposits: sedimentary exhalative (SEDEX) and Mississippi type (MVT); volcanogenic massive sulphide deposits (MVS); skarns; vein type hydrothermal deposits and non-sulphide Zn-Pb deposits: supergene and hypogene.

**Key words:** Pb-Zn deposits, genetic types, distribution

### ОСОБЕНОСТИ НА ГЛАВНИТЕ ГЕНЕТИЧНИ ТИПОВЕ ПРОМИШЛЕНИ ОЛОВНО-ЦИНКОВИ НАХОДИЩА

Михаил Петров

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

**РЕЗЮМЕ.** Оловно-цинковите находища имат комплексен характер и са основен източник освен на металите Pb и Zn и на ценни съпътстващи компоненти като Ag, Cu, Au, Cd, In, Sn, Sb, Bi, Se, Te и др. В зависимост от генетичния тип, находищата се различават значително по големината, морфологията на рудните тела, съдържание на рудните минерали и метали, вид и концентрации на елементите-примеси в рудите и др. В настоящата работа са разгледани основните характеристики и разпространението в света на главните генетични типове промишлени сулфидни и несулфидни Pb-Zn находища – находища сред седиментни скали – седиментно-ексхалативни (SEDEX) и тип Мисисипи (MVT); вулканогенни масивно-сулфидни (MVS); скарнови; жилни хидротермални и несулфидни Zn-Pb находища – супергенни и ендеогенни.

**Ключови думи:** Pb-Zn находища, генетични типове, разпространение

### Въведение

Оловото и цинкът са два от най-важните метали с широк спектър от приложения, със съществено значение за развитието на технологиите и икономиката. Цинкът представлява третият най-използван цветен метал след алуминия и медта. Оловото и цинкът най-често се срещат съвместно в едни и същи сулфидни и несулфидни рудни находища. Добивът на металите се извършва предимно от Pb-Zn сулфидни руди, в които рудните минерали са представени главно от галенит (PbS) и сфалерит (ZnS), и по-рядко металите се добиват от церусит (PbCO<sub>3</sub>), англезит (PbSO<sub>4</sub>), смитсонит (ZnCO<sub>3</sub>) и хемиморфит [Zn<sub>4</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>7</sub>(OH)<sub>2</sub>·H<sub>2</sub>O], от несулфидните Zn-Pb руди. Според Григорова (Григорова, 2020) разнородният характер на скалните разновидности неимоверно усложнява минно-добивния процес, като създава трудности главно при раздробяването на минната маса, а оттам и в последващите производствени дейности. Производството на металите Pb и Zn се извършва в по-малки количества и от вторични ресурси, чрез преработка и рециклиране на различни олово- и цинксъдържащи отпадъци, оловно-киселинни акумулатори и др.

Оловно-цинковите находища са неравномерно разпространени в света и в зависимост от геоложките условия на образуване се характеризират с различна морфология на рудните тела, различно съдържание на рудните минерали и елементите-примеси. Оловно-цинковите сулфидни руди имат комплексен характер и често съдържат значителни количества от Cu, Ag, Au, Cd, In, Sn, Sb, Bi, Se, Te и др., които се извличат като попутни компоненти (Лобанов и Некос, 2017). Около 34% от световния добив на Ag се извършва от оловните

концентрати, от които се добиват също Se, Te, Bi и др., докато от цинковите концентрати се извличат Cd и критични метали като In, Ge, Ga. Според Лобанов и Некос (2017) в Pb-Zn руди са концентрирани над 80% от световните запаси от Cd, 40-50% от Tl, 25-30% от Ge, 20-25% от Se, Te, In, 15-20% от Ga и Bi. Често в Pb-Zn находища промишлено значение имат и неметалните суровини барит и флуорит.

В настоящата работа се разглеждат основните характеристики и разпространението в света на главните генетични типове сулфидни и несулфидни Pb-Zn находища – находища сред седиментни скали – седиментно ексхалативни (SEDEX) и тип Мисисипи (MVT); вулканогенни масивно-сулфидни (MVS); скарнови; жилни хидротермални и несулфидни, супергенни и ендеогенни Zn-Pb находища.

### Главни генетични типове промишлени Pb-Zn находища в света

#### Сулфидни Pb-Zn находища

**Сулфидни Pb-Zn находища сред седиментни скали.** Анализът на световните Pb-Zn находища по отношение на количеството рудни запаси, съдържание на Pb и Zn и съпътстващи ценни продукти, икономическа стойност, геоложки условия и др. показват, че в глобален мащаб най-значителните ресурси от металите Pb и Zn са съсредоточени в **находищата сред седиментни отложения** (*sediment – hosted deposits*) (Leach et al., 2010; Williams, 2014; Mud et al., 2017). Тези находища са най-главният световен източник на Pb и Zn, но също и важен



източник на други метали – Ag, Cu, As, Bi, Sb, Hg, Mn, Ni, Ti, включително и на критичните метали In, Ge, Ga и др., с важно значение за развитието на новите технологии (Mud et al., 2017). При формирането на рудите в Pb-Zn находища сред седиментни скали отсъства генетична връзка с прояви на магмена дейност. Pb-Zn находища са представени от два типа – *седиментно-ексхалативни находища (Sedimentary exhalative deposits - SEDEX)* и *Мисисипи тип находища (Mississippi Valley type – MVT)*, означавани още като *стратабаунд или стратиформни*. Основната разлика между тези два типа находища е, че се формират от нискотемпературни хидротермални разтвори, но в различна геоложка обстановка. SEDEX находищата се формират във вътрешноконтинентални рифтове, разломно ограничени басейни на морското дъно и са сингенетични (образувани едновременно с вместващите скали). Находищата тип Мисисипи (MVT) се образуват в платформени карбонатни комплекси и са епигенетични (постседиментационни). Геоложката възраст на находищата тип SEDEX варира в диапазона протерозой – терциер, а на MVT – от девон до перм и от креда до терциер.

**Седиментно-ексхалативни Pb-Zn находища (Sedimentary exhalative deposits - SEDEX).** Находищата са разпространени предимно в Северна Америка, Австралия и Азия и са вмествени сред финозърнести кластични скали, глинесто-теригенни, алевролити, шисти, рядко сред карбонатни скали. Рудните тела имат пластовидна, лентовидна, лещовидна форма и са изградени от финослоеста, финозърнеста руда, проследяваща се с вместващите скали. Големината на находищата варира, като достига до гигантски размери, със запаси от порядъка на стотици милиони тона руда. От рудите се добиват Pb, Zn, Ag, Cu, Co.

Значителна част от световния добив на металите Pb и Zn се извършва от находищата Mount Isa (Маунт Айза, Канада) и Red Dog (Ред Дог, Аляска, САЩ). Други Pb-Zn SEDEX тип рудни райони и находища са Брокън Хил, Марк Артър Ривър, Хилтън (Австралия), Том, Фаро, Хауърдс Пас (Юкон, Канада) и др. (Spry et al., 2009; Gadd et al., 2017; Gigon et al., 2020 и др.). Гигантско по размери е Pb-Zn-Ag тип SEDEX находище Горевско в Русия. Pb-Zn находища

от този тип са известни и в Европа - в Германия (Рамелсберг, Меген), Испания, Швеция, Белгия и др.

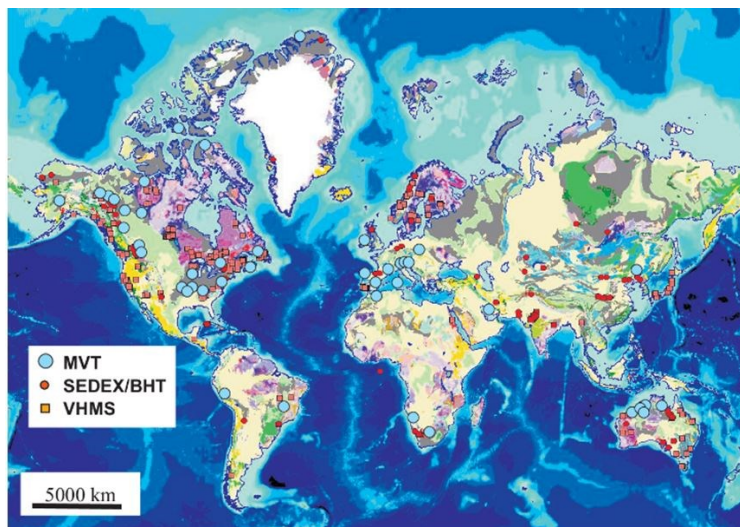
Находището Маунт Айза (Куинсланд, Австралия) е открито през 1923 г и се експлоатира за добив на Cu, Pb, Zn и Ag. В находището пространствено са обособени два типа руди – горен хоризонт с медно орудяване и долен хоризонт с Pb-Zn руди сред протерозойски шисти. Рудните тела имат пластовидна, лентовидна, лещовидна форма, като дължината им достига до 1-2 km, дебелината до около 50 m, а на дълбочина орудяването достига до 800 m. Към 2020 г. находището разполага с 395 Mt Pb-Zn руда със съдържание на Zn – 6.9%, Pb – 3.6% и Ag – 69 g/t.

Находището Ред Дог (Аляска, САЩ) е на второ място в света по производство на Zn, като се добиват още Pb, Ag и барит. Експлоатира се по открит способ от 1989 г. Вместващите скали са представени от черни шисти, алтерниращи с карбонати, сред които послонно са разположени масивни сулфидни рудни тела.

Находището Марк Артър Ривър (Северна Австралия) е едно от най-големите Zn-Pb находища в света, в експлоатация от 1993 г. Към 2019 г. находището включва 172 Mt руда, със съдържания на Zn – 9.9%, Pb – 4.6%, Ag – 47 g/t (Gigon et al., 2020). Рудата има ивичест строеж и е съставена главно от слоеве сфалерит, галенит и пирит, алтерниращи със слоеве от вместващите скали.

Счита се, че находището Брокън Хил (Австралия) представлява най-голямото натрупване на Pb, Zn, Ag в света. Находището е открито през далечната 1883 г. Според някои изследователи, първичното сулфидно орудяване е SEDEX тип, но по-късно е било подложено на метаморфизъм в амфиболит-гранулитов фациес, нагъване и деформации (Spry et al., 2009). Други автори го определят като отделен подтип BHT (Broken Hill-type) находище. Рудите са масивни, богати на прекристализирал сфалерит, галенит или галенит-сфалерит и образуват лещовидни тела сред нагънатите хоризонти от вместващите ги гнайси. Често рудните тела са изцяло (100%) съставени от галенит и сфалерит, без примеси от други сулфиди. Характерно за находището е високото съдържание на металите Pb + Zn + Ag и съотношението Pb > Zn (Spry et al., 2009).

Разпространението на по-големите Pb-Zn находища тип SEDEX в света е показано на фиг. 1.



Фиг. 1. Разпространение на сулфидните Pb-Zn находища тип SEDEX, MVT и VMS в света (Paradis et al., 2007)

**Muscunipun Pb-Zn находища (Mississippi Valley type – MVT).** В глобален мащаб Pb-Zn находища Мисисипи тип (MVT) осигуряват около 30% от световния добив на Pb и Zn. В рудите от тези находища могат да присъстват и повишени съдържания на Ag, Sb, Bi, As, Cd, Co, Ga, In, Hg, Mo, Ni и Tl (Галямов и др. 2020). Находищата са наречени по този начин, тъй като голям брой от класическите MVT Pb-Zn рудни райони, включващи редица големи находища, са разположени по долината на р. Мисисипи, простират се на стотици km<sup>2</sup> и са представлявали основният източник на Zn и Pb в САЩ през 19-ти и 20-ти век. В по-старата литература този тип находища са означавани като стратиформни или стратабаунд. Pb-Zn находища тип Мисисипи са вместили сред карбонатни скали – варовици и доломити в определен стратиграфски интервал, характеризират се с предимно пластовидни рудни тела, формирани в резултат на метасоматично заместване на вместилищните скали, и по-рядко срещани жиловидни и стълбовидни рудни тела, вследствие запълването на карстови празнини, кухини и др. Преобладаващите рудни минерали са галенит, сфалерит, пирит, марказит и халкопирит, от нерудните – доломит, калцит, флуорит, барит и кварц. Находищата са епигенетични, формирани от нискотемпературни разтвори с температура 100-150°C, рядко до 200°C (Вангелова, 2013).

Най-големите и добре проучени находища от този тип се намират в басейна на р. Мисисипи, САЩ. Основен глобален източник на Pb-Zn руди са групата находища Вибърнъм Тренд – Вибърнъм, Флетчър, Бръши Крик, Магмонт Бюик (руден район ЮИ Мисури, САЩ), Пайн Понт, Поларис (Канада), Тара, Наван (Ирландия), Реосин, Рубиалес (Испания), Ангуран (Иран) Тунсит (Мароко) и др. (Галямов и др., 2020). Други известни находища са Адмирал Бей, Нюфаундленд (Австралия), Фанкоу (КНР), Комдок (КНДР), Мехдибад (Иран), Сан Висент (Перу), Миргалимсай (Казахстан), Сардана (Якутия) и др. Pb-Zn находища тип Мисисипи присъстват и в Полша, Франция, Австрия, Белгия, България, Сърбия, Турция, страни от Северна и Южна Африка и др. От този тип в България е експлоатираното в миналото находище Седмочисленици, в Западна Стара планина.

В централната част на САЩ са известни редица Pb-Zn рудни райони, включващи голям брой находища – Горен Мисисипи, Централен Мисури, ЮИ Мисури, Три Стейт, Северен Арканзас. Находищата са вместили предимно сред варовици и се характеризират с пластовидни залежи, по-рядко с жиловидни и стълбовидни рудни тела.

Основните рудни минерали са галенит и сфалерит, на места съпътствани от пирит и марказит. Рудите се отличават с повишени съдържания на Cu, Cd, Ge, Ga и, за разлика от други находища от този тип, показват ниски концентрации на Ag, Bi, Sb.

Находище Наван (Ирландия). През последните години Ирландия е главният източник на Zn в Европа. Експлоатирани в миналото и днес са голям брой находища, вместили сред седиментни карбонатни скали – Наван, Тара, Лишин, Силвърмайн, Галмой и др. Някои характеристики на находищата съответстват на тип Мисисипи, други на SEDEX тип, затова редица автори ги разглеждат като отделен клас хидротермални находища, наречен „Ирландски тип Pb-Zn находища“. В находището Наван са установени голям брой лентовидни и лещовидни рудни тела с варираща дебелина и ивичеста текстура.

Главните рудни минерали са сфалерит и галенит, в съотношение около 5:1, второстепенни - пирит и марказит и нерудни – калцит, доломит, барит. Към 2018 г. общото количество добита руда и запаси от мините Тара и Тара Дийп (Tara Deep) е 135 Mt руда, 7.7% Zn, 1.8 % Pb (Yesares et al., 2019). Разпространението на MVT Pb-Zn находища в света е представено на фиг.1.

**Вулканогенни масивно-сулфидни Pb-Zn находища (volcanogenic massive sulphide - VMS)** За разлика от находищата тип SEDEX и MVT, които са източник главно на Pb-Zn руди, вулканогенните масивно-сулфидни (VMS) находища са източник предимно на Cu-Zn руди, Au, Ag, Pb. Като съпътстващи елементи в рудите присъстват Co, Sn, Ba, Se, Te, Mn, Cd, In, Bi, Ge, Ga и др. Находищата се означават от някои западни автори и като Volcanic-hosted massive sulfide (VHMS), тъй като са вместили сред вулкански скали. Образоването им се извършва на/или в близост до морското дъно и е тясно свързано с подводна вулканична дейност. VMS находищата са сингенетични, формирани едновременно с вместилищните ги вулканоседиментни стратиграфски последователности. Над 60 % от сулфидните руди в тези находища са обособени в лентовидни, лещовидни масивни рудни тела, а под тях в подстилащите скали присъства жилна или шокверкова сулфидна минерализация. Срещат се VMS находища с някои специфични характеристики, затова VMS са поделени на няколко типа: Тип Беси, Кипърски тип, Куроко тип и “Примитивен тип“ (Вангелова, 2013).

Много голямо по размери VMS находище е Кид Крик (Онтарио, Канада), с настоящи запаси от 21.5 Mt руда с 4.93% Zn, 2.04 % Cu и 53 g/t Ag и със запаси в миналото от 151.2 Mt руда с 6.04% Zn, 2.23 % Cu, 0.2% Pb и 82 g/t Ag (Mudd et al., 2017). Големи по размери са и Zn-Cu-Pb-Ag-Cu находище Волверин (Юкон, Канада) и Zn-Pb-Cu находище Khnaiguiyah в Саудитска Арабия.

Счита се, че най-голямата концентрация в света на вулканогенни масивни руди е разположена в Иберийския пиритен пояс (IPB), който от праисторически времена представлява една от най-големите рудни провинции в Европа. Иберийският пиритен пояс (IPB) включва множество огромни по размери находища, като Рио Тинто, Невес Корво и др., със запаси общо от около 2000 Mt руда (Almodovar et al., 2019). VMS находището Невес Корво (Португалия) представлява най-богатото рудно находище в Иберийския пиритен пояс с над 300 Mt полиметални (Cu, Zn, Sn, Pb) сулфидни руди, обособени в лещовидни рудни тела (Moura, 2008; Almodovar et al., 2019). Находището се отличава от останалите VMS находища с наличието на висококачествени руди (средно 8% Cu и големи обеми с над 20% Cu) и блокове от почти чист каситерит, с 65% Sn. От рудите се добиват медни и цинкови концентрати, като за 2023 г. планираният добив е 100 000 – 110 000 t Zn и 33000 – 38000 t Cu.

Разпространението на Pb-Zn VMS находища в света е показано на фиг. 1.

**Скарнови Pb-Zn находища.** Скарновите находища са широко разпространени в света и са представени от няколко основни вида, съдържащи руди на металите Fe, W, Mo, Sn, Cu, Au, Ag, Pb-Zn. Находищата се образуват в резултат на контактен или регионален метаморфизъм, вследствие метасоматичното въздействие на

хидротермални флуиди с магмен произход, предимно върху карбонатни скали. За разлика от всички видове скарнови находища на останалите метали, скарновите Pb-Zn находища се разполагат на голямо разстояние и без установена видима връзка с интрузивни тела. Друго отличие на скарновите Pb-Zn находища е, че се образуват по протежение на големи разломни зони, зони на срязване или литоложки контакти. Повечето находища са вместилища сред карбонатни скали и са разположени на значително разстояние от магмения източник на хидротермалните флуиди. В тях се наблюдава зоналност по отношение състава на скарновите минерали и рудната минерализация (Meinert, 1987; Meinert et al., 2005). В Pb-Zn находища се разграничават зони от скарнова минерализация с високо съотношение на пироксени/гранати, следваща рудна зона с малко количество скарнови минерали и извън скарните сред вместиращите карбонатни скали се разполагат рудните тела с пластовидна, лещовидна, стълбовидна или жилна форма. Главните рудни минерали са представени от сфалерит, галенит, пирит, халкопирит, Ag – съдържащи сулфосоли и др., съпътствани от Mn-съдържащи пироксени и гранати.

Zn-Pb-Cu-Ag находище Groundhog (Грунтхог, Ню Мексико) е едно от най-големите и най-добре изучени скарнови находища в САЩ. Орудяването е свързано с множество дайки от гранодиорит порфири, вместилища по разломи. Полиметалните рудни тела имат жилна форма, а на дълбочина, в местата, в които рудните жили пресичат варовици, са развити скарнови и метасоматични залежи. В находището има ясно изразена зоналност и съотношенията между металите Zn/Cu, Zn/Ag, Pb/Cu, Pb/Zn, Pb/Ag в рудите се увеличават в посока към по-отдалечените от дайките участъци, в които са обособени най-богатите руди, с максимални съдържания на Pb и Zn. Зоналност се наблюдава и в състава на скарновите минерали (Meinert, 1987).

Cu-Zn скарново находище Антамина, Перу е едно от най-големите световни находища и е разположено в Андите на около 4300 m надморска височина. Скарновото орудяване е свързано с кварц-монцитови интрузиви и дайки, сред вместиращи карбонатни скали. Около интрузивите и дайките се установява отчетлива зоналност в скарните и орудяването, като в близост до магмените тела рудите са Cu-Mo, а в най-отдалечените участъци, рудите са Zn-Pb±Ag±Bi. Към 2016 г. запасите от медна сулфидна руда в находището са 317 Mt руда с 1.01% Cu, 0.16% Zn, 8 g/t Ag и 0.034% Mo. Запасите от цинкова сулфидна руда са 256 Mt руда с 2.03 % Zn, 0.89% Cu, 14 g/t Ag и 0.008 % Mo. Перу е основният световен източник на металите Zn и Ag и вторият производител на Cu, след Чили.

#### **Хидротермални жилни Pb-Zn находища.**

Хидротермалните жилни Pb-Zn находища имат значително разпространение в света и представляват важен източник за получаване освен на Pb и Zn, също на Ag, Au, Cu и други съпътстващи метали. Находищата по правило са локализиращи в неблагоприятни за метасоматични процеси метаморфни, магмени или седиментни скали и са привързани към разломи. Отсъства универсална класификация на този тип находища, но според повечето автори формирането им се извършва от хидротермални флуиди, свързани с магмен източник.

Рудните тела имат жилна форма, главните рудни минерали са представени от галенит, сфалерит, пирит, халкопирит и др., а нерудните – от кварц, карбонати, барит, флуорит. Често в находищата има отчетливо изразена вертикална минерална зоналност – Au и Ag се концентрират в най-горните части на рудните тела, в средната част преобладават Pb и Zn, а в най-ниските нива преобладава Cu.

Рудният район Фрайберг представлява типичен пример за полиметални жилни орудявания (Swinkels et al., 2021). Рудният район се намира в североизточната част на Ерцгебирге (Рудните планини), една от най-важните металогенни провинции в Европа, включваща множество находища от различен генетичен тип – грайзенови, скарнови и хидротермални жилни. Във Фрайбергския руден район е установена гъста мрежа от над 1000 полиметални рудни жили, привързани към разломи сред вместиращите скали, на площ с размери около 30 x 30 km. Рудните жили са три типа: кварц-карбонат-сулфидни; флуорит-барит-кварц-Pb-Zn и по-рядко т.н. пет елементни - Bi-Co-Ni-Ag-As, като с преобладаващо икономическо значение са първият вид рудни жили (Swinkels et al., 2021). В миналото от района първоначално е добивано главно Ag, а през по-късните етапи на експлоатация – Pb, Zn, Cu и Sn. За около 800 години (1168 – 1969 г.) са добити около 5600 t Ag. Експлоатацията е била концентрирана предимно в централната част на района в близост до градовете Фрайберг и Бранд-Ербисдорф. Счита се, че северната част на района има потенциал за добив на Ag, Au, Pb, Zn.

Рудният район Банска Щявница (Banska Štiavnica), Словакия, включващ полиметални жилни находища, представлява един от най-богатите рудни райони в Европа. На площ около 100 km<sup>2</sup> са установени около 120 кварц-карбонат-сулфидни жили. В рудните жили присъства ясно изразена вертикална зоналност – в горните части най-високо е съдържанието на Au, Ag, в средните части – на Pb, Zn и в най-дълбоките нива – на Cu. От рудите са добивани металите Ag, Au, Pb, Zn, Cu. За времето на експлоатация са добити над 100 t Au и 1500 - 2000 t Ag.

Хидротермални жилни Ag-Pb-Zn находища присъстват в Мексико, Перу, Боливия, Испания, Австралия и др. За много от тези находища е характерна вертикална и хоризонтална зоналност. На малка и средна дълбочина (100-1000 m) рудите имат високо съдържание на Ag, а с увеличаване на дълбочината нарастват съдържанията на Pb и Zn (Swinkels et al., 2021).

В нашата страна хидротермалните жилни Pb-Zn находища са разположени предимно в три рудни района – Централнородопски, Източнородопски и Осоговски. В настоящия момент добив на Pb-Zn руди се извършва в някои от находищата в Централнородопския и Източнородопския рудни райони.

#### **Несулфидни Zn-Pb находища**

Несулфидните цинкови руди, са били използвани за получаване на месинг в древността, много преди да започне преработката на сулфидните Pb-Zn руди. Рудите са описвани с названието "Calamine", "Galmei", но всъщност представляват нееднородна смес, съдържаща цинкови карбонати, от която е произвеждан месингът, широко използван в цяла Европа и Средиземноморието. Находища на „каламин“, експлоатирани в миналото са известни в района на Силезия-Краков (Полша); Келмис или

La salamine (Лиеж, Белгия); Иглесиас (Ю. Сардиния, Италия); Лаврион, (Гърция) и др.

През последните 15-20 години се наблюдава засилен интерес към несулфидните Zn-Pb находища, като се очаква годишното производство на Zn от тези находища да надхвърли 10% от общото световно производство на метала (Boni, 2003; Nuspl and Gutzmer, 2009; Boni and Mondillo, 2015; Kania et al., 2023). Някои предимства на несулфидните находища са следните: наличие на значителни запаси от метала Zn, най-често над 100000 тона, отсъствие или ниско съдържание на S, Pb и други нежелани компоненти, ниски енергийни разходи за производството на Zn или на чист ZnO, по-висока икономическа ефективност и др. (Boni, 2003). Находищата включват от < 1 до над 200 Mt руда със съдържание на Zn от 7 до над 30% и са потенциален източник на критични метали като Ge, Ga, In, които се получават като странични продукти.

Несулфидните Zn-Pb находища се поделят на два вида – супергенни и ендеогенни, в зависимост от техния минерален състав, геоложки особености и генезис (Hitzman et al., 2003; Boni and Mondillo, 2015; Santoro et al., 2020).

**Супергенните несулфидни Zn-Pb находища** имат широко разпространение в целия свят и най-често са вместилища сред седиментни карбонатни скали. Формират се в резултат на изветрянето и окислението на първичните сулфиди (галенит, сфалерит), в рудите от Pb-Zn находища тип MVT, SEDEX и VMS. В зоната на окисление просмукващите се метеорни води, често смесени с подпочвени води, извличат металите Pb, Zn, Fe и др. и ги преотлагат под формата на вторични карбонати, силикати, оксиди и др. Отлагането на вторичните минерали на Zn и Pb може да се извърши непосредствено върху първичното сулфидно рудно тяло или на значително разстояние, вследствие на заместване на вместилащите карбонатни скали или в пазнини и карстови кухини. Главните промишлени рудни минерали в този тип находища обикновено са представени от смитсонит  $[ZnCO_3]$ , хемиморфит  $[Zn_4Si_2O_7(OH)_2 \cdot H_2O]$ , хидроцинкит  $[Zn_5(CO_3)_2(OH)_6] \pm$  церусит  $[PbCO_3]$ . От находищата се добива главно Zn, тъй като  $ZnSO_4$ , получен при окислението на сфалерита има по-голяма миграционна способност, в сравнение с оловото. В някои от

несулфидните Zn-Pb находища присъстват 2 вида руди - червена руда с високо съдържание на Zn и Fe, вследствие наличието на Fe оксиди и хидроксида и бяла руда с високо съдържание на Zn и без Fe. Първият вид руда (“каламин”) се образува при директното заместване на първичните сулфиди, а вторият тип – в резултат на заместване от разтворите на вместилащите скали.

**Ендеогенните несулфидни Zn-Pb находища** се образуват под въздействието на хидротермални и/или метаморфни разтвори, които променят химизма на първичните сулфидни руди и водят до отлагането на безводни цинкови силикати и оксиди като вилемит  $(Zn_2SiO_4)$ , цинкит  $(ZnO)$  и франклинит  $(ZnFe_2O_4)$ , на места съпътствани от непроменени първични сулфиди.

В напреднал стадий на експлоатация или в процес на разработване са някои от следните средно- до големи несулфидни Zn-Pb находища: Skorpion (Скорпион, Намибия), Mae Sod (Mae Sod, Тайланд), Lan Ping (Лан Пинг, Китай), Angouran и Mehdiabad (Ангуран и Мехдиабад, Иран), Shaimerden (Шаймерден, Казахстан), Jabali (Джабали, Йемен), Hakkari (Хакари, Турция), Vazante (Вазанте, Бразилия), Accha, Yanque и Bongara (Ача, Янке и Бонгара, Перу), Torton Hill (Тортон Хил, Гватемала), Sierra Mojada (Сиера Мохата, Мексико) и др. (Boni and Mondillo, 2015). Сравнително неотдавна е открито огромното несулфидно Pb-Zn находище Huoshaoyun (Хуошаоюн, Китай), със запаси от 18 Mt метали Zn+Pb, което представлява най-голямото Pb-Zn находище в Китай и е едно от най-значителните находища в света.

Големи несулфидни Pb-Zn  $\pm$  Cu находища се експлоатират по открит способ в районите Touissit Bou Beker (Туисит Бу Бекер) и Jebel Bou Dahar (Джебел Бу Дахар), Мароко, като в първия район съотношението Pb:Zn е 5:1 и се добива церусит-англезитова руда за получаване на Pb, а от рудите от втория район, на места със съдържание на ZnO до над 30 %, се получават Zn, Pb и барит (Bouabdellah et al., 2021). Несулфидни Zn-Pb находища са известни и в редица други страни – Виетнам, Алжир, Египет, Британска Колумбия (Канада), Ирландия и др.

Разпространението на главните несулфидни Zn-Pb находища в света е представено на фиг. 2.



Фиг. 2. Разпространение на несулфидните Zn-Pb находища в света. С червен цвят са означени областите с потенциал за Zn-Pb супергенни несулфидни находища (Nuspl and Gutzmer, 2009)

## Заклучение

Получаването на металите Pb и Zn от сулфидните руди се извършва с прилагането на флотационно обогатяване, пържене на концентратите и последващ пирометалургичен или хидрометалургичен метод. В зависимост от минералния състав на несулфидните Zn-Pb руди, съдържащи карбонати, силикати, оксиди, при преработката им се използват различни методи, включително флотационно обогатяване, пържене и хидрометалургични методи - киселинно излужване със H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> или алкално излужване с NH<sub>3</sub> и амониеви соли за селективно извличане на металите.

## Литература

- Вангелова, В. (2013). Рудообразователни процеси. – СУ“Св. Климент Охридски”, катедра „Минералогия, петрология и полезни изкопаеми, 195 с. [https://www.unisofia.bg/index.php/bul/universitet/fakulteti/geologo/geografski/fakultet/oficialni\\_izdanya](https://www.unisofia.bg/index.php/bul/universitet/fakulteti/geologo/geografski/fakultet/oficialni_izdanya)
- Галамов, А. Л., Волков, А. В., Мурашов, К. Ю., Сидорова, Н. В., Кузнецова, Т. П. (2020). Перспективы выявления месторождений миссисипского типа на Северо-Востоке России. *Литосфера*, 20, 2, 254-270. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2020-2-254-270>
- Григорова, М., (2020). Геофизични методи при решаване на инженерно-геоложки задачи свързани с повишаване ефективността в условията на открит рудник „Хан Крум“, *Сп. Геология и минерални ресурси*, 6-7/2020, стр. 3-9, ISSN: 1310-2265.
- Лобанов, К. В., Некос, В. В.. (2017). Месторождения типа SEDEX – важнейший источник Zn, Pb и Ag в мире. Краткий мировой обзор. Перспективы России и Красноярского края. *Журнал Сибирского федерального университета. Техника & Технологии*, 10 (7), 881-907. <https://elib.sfu-kras.ru/handle/2311/68733>
- Almodovar, G. R., Yesares, L., Saez, R., Toscano, M., Gonzalez, F., Pons, J. M. (2019). Massive Sulfide Ores in the Iberian Pyrite Belt: Mineralogical and Textural Evolution. *Minerals*, 9 (11), 653, 1-20. <https://doi.org/10.3390/min9110653>
- Boni, M., Large, D. (2003). Nonsulfide Zinc Mineralization in Europe: An Overview. *Economic Geology*, 98 (4), 715-729. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.98.4.715>
- Boni, M., Mondillo, N. (2015). The “Calamines” and the “Other”. The great family of supergene nonsulfide zinc ores. *Ore Geology Reviews*, 67, 208-233. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.10.025>
- Bouabdellah, M., Boukirou, W., Melchiorre, E. B., Potra, A., Levresse, G. (2021). Origin of the Moroccan Touissit-Bou Beker and Jbel Bou Dahar Supergene Non-Sulfide Biomineralization and its Relevance to Microbiological Activity, Late Miocene Uplift and Climate Changes.- *Minerals*, 11 (4), 401. <https://doi.org/10.3390/min11040401>
- Gadd, M. G., Matthews, D. L., Peter, J. M., Paradis, S., Jonasson, I. R. (2017). The world-class Howard s Pass SEDEX Zn-Pb district, Selwyn Basin, Ykon. Part II: the roles of thermochemical and bacterial sulfate reduction in metal fixation. *Mineralium Deposita*, 52, 405-419. <https://doi.org/10.1007/s00126-016-0672-x>
- Gigon, J., Deloule, E., Mercadier, J., Huston, D. L., Richard, A., Annesley, I. R., Wygralak, A. S., Skirrow, R. G., Mernagh, T. P., Masterman, K. (2020). Tracing metal sources for the giant McArthur River Zn-Pb deposit (Australia) using lead isotopes. *Geology*, 48, 478-482. <https://doi.org/10.1130/G47001.1>
- Hitzman, M. W., Reynolds, N. A., Sangster, D. F., Allen, C. R., Carman, C. E. (2003). Classification, Genesis, and Exploration Guides for Nonsulfide Zinc Deposits. *Economic Geology*, 98 (4), 685-714. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.98.4.685>
- Kania, H., Saternus, M. (2023). Evaluation and Current State of Primary and second Zinc Production. *A Review. Applied Sciences*, 13, 1-22. <https://doi.org/10.3390/app13032003>
- Leach, D. L., Bradley, D. C., Huston, D., Pisarevsky, S. A., Taylor, R. D., Gardoll, S.J. (2010). Sediment-hosted lead-zinc deposits in Earth history. *Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists*, 105, 593-625. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.105.3.593>
- Mudd, G. M., Jowitt, S. M., Wernet, T. T. (2017). The world's lead-zinc mineral resources: Scarcity, data, issues and opportunities. *Ore Geology Reviews*, 80, 1160 – 1190. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.08.010>
- Meinert, L. D. (1987). Skarn zonation and fluid evolution in the Groundhog Mine, Central mining district. *Economic Geology*, 82, 3, 523-545. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.82.3.523>
- Meinert, L. D., Dipple, G. M., Nicolescu, S. (2005). World Skarn deposits. *Economic Geology 100 the Anniversary*, 299-336. <https://doi.org/10.5382/AV100.11>
- Nuspl, A., Gutzmer, J. (2009). Genesis of nonsulfide zinc deposits and their future utilization. *Geology 12*. Freiberg, Germany: Institute of Mineralogy 1–12
- Paradis, S., Hannigan P., Dewing K. (2007). Mississippi valley-type lead-zinc deposits (MVT), 1-15. <https://www.researchgate.net/publication/228477629>
- Spry, P. G., Teale, G. S., Steadman, J. A. (2009). Classification of Broken Hill-Type Pb-Zn-Ag Deposits: A Refinement. *Eos Transactions AGU*, v. 90 (22), Joint Assembly Supplement, Abstract, V21A-01. <https://www.science.gov/topicpages/p/pb-zn+sedex+deposits>
- Swinkels, L. J., Isenbeck, J. S., Frenzel, M., Gutzmer, J., Burisch, M. (2021). Spatial and Temporal Evolution of the Freiberg Epithermal Ag-Pb-Zn District, Germany. *Economic Geology*, 116, 1649-1667. <https://doi.org/10.5382/econgeo.4833>
- Williams, K. (2014). SEDEX: The biggest lead and Zinc Deposits in the World. - <https://www.geologyforinvestors.com/sedex-biggest-lead-zinc-deposits-world/>
- Yesares, L., Drummond, D. A., Hollis, S. P., Doran, A. L., Menuge, J. F., Boyce, A. J., Blakeman, R. J., Ashton, J. H.. (2019). Coupling mineralogy, textures, stable and radiogenic isotopes in identifying ore-forming processes in Irish type carbonate-hosted Zn-Pb deposits. *Minerals*, 9 (6), 27. <https://doi.org/10.3390/min9060335>



## INCREASING THE EFFICIENCY OF Pb-Zn ORE COMMINUTION BY OPTIMISING THE CRUSHING PROCESS

*Mihail Petrov, Teodora Yankova, Irena Grigорова*

*University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: misho\_mgu@abv.bg*

**ABSTRACT.** Ore comminution is important for high-grade concentrates production and has a significant impact on the production costs of beneficiation plants, due to the high electricity consumption in the crushing and grinding processes. This paper examines the implementation results of a new two-stage ore crushing and screening circuit which replaces the three-stage crushing circuit with outdated equipment in a concentrator. The new two-stage crushing circuit includes modern high-performance equipment with low energy consumption: a Nordberg C116 jaw crusher – for coarse crushing, a Nordberg GP 220 cone crusher – for fine crushing, and a Nordberg TS 4.2 screening machine. Optimising the crushing technological mode in the mineral processing plant results in an increased production capacity and efficiency of the downstream processes along the chain: grinding and flotation, and a lower cost of the produced concentrates.

**Key words:** ore comminution, crushing circuit, optimisation.

### ПОВИШАВАНЕ ЕФЕКТИВНОСТТА НА РУДОПОДГОТОВКА, ЧРЕЗ ОПТИМИЗИРАНЕ НА ПРОЦЕСА ТРОШЕНЕ НА Pb-Zn РУДИ

*Михаил Петров, Теодора Янкова, Ирена Григорова*  
*Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София*

**РЕЗЮМЕ.** Зърнометричната подготовка на рудите има важно значение за производството на висококачествени концентрати и оказва съществено влияние върху производствените разходи на обогатителните фабрики, поради високото потребление на електроенергия при процесите трошене и смилане. В настоящата статия се разглеждат резултатите от внедряването на нова, двустадиялна схема на трошене и пресяване на рудите, заместваща тристадиялната схема на трошене с остаряло оборудване в обогатителна фабрика. Новата двустадиялна схема на трошене включва съвременно, високопроизводително оборудване с ниска енергоемкост: челюстна трошачка Nordberg C116 – за едро трошене, конусна трошачка Nordberg GP 220 – за ситно трошене и пресевна машина Nordberg TS 4.2. Оптимизирането на технологичния режим на трошене в обогатителната фабрика води до повишена производителност и ефективност и на следващите процеси по веригата - смилане и флотация и по-ниска себестойност на произвежданите концентрати

**Ключови думи:** зърнометрична подготовка, схема на трошене, оптимизиране

### Въведение

Преработката на рудите на цветни метали в обогатителните фабрики, до получаването на крайните продукти от концентрати, включва процесите трошене, смилане, пресяване и флотация. Важно значение за технико-икономическите показатели при обогатяването на рудите има ефективността на технологичните процеси трошене и смилане, поради високата консумация на електроенергия и високите производствени разходи. Ниската ефективност на тези процеси води като следствие до по-ниска ефективност на последващата флотация и загуба на метали в отпадъка. Както споменава Томова, преработката на полезни изкопаеми е насочена към извличане на най-ценните компоненти от рудата, докато останалата част от материала се депонира в отпадъкохранилища (Томова, 2023). При постигнат оптимален зърнометричен състав на рудата се получава необходимото разделяне на рудните минерали в последващата преработка на рудата и необходимото качество на получаваните концентрати, съответстващо на изискванията за металургична преработка, предотвратява се загубата на ценни метали и се редуцират производствените разходи.

В рудните находища, вместващите скали и рудите имат различна твърдост, в зависимост от техния минерален и химичен състав и геоложките условия. Според Мочев и Григорова (2015), разрушаването на скалите започва в макро мащаб далеч преди намесата на човека. Тектониката и земната ерозия са в някаква степен

прототип на механичната преработка на минералните суровини – напукване на скалите, изветрителни процеси, транспортиране и „класиране“ на разрушените скални маси, финализиращи се в седиментацията на различните зърнометрични класи във водоемите, както и на земната повърхност (Мочев, Григорова, 2015). И тъй като скалните разновидности и рудите имат разнороден състав, минно-добивният процес се усложнява, като възникват затруднения главно при раздробяването на рудната маса (Григорова, 2020). За изучаване на характеристиките на находищата и детайлното картиране на скалните разновидности е подходящо и сравнително лесно приложимо използването на геофизични методики, базиращи се на разликата във физичните свойства на рудните минерали с различен състав и вместващите ги скали (Томова, 2023).

Едно от направленията за оптимизиране дейността на обогатителните фабрики се състои във внедряването на съвременно оборудване от най-ново поколение в схемите на трошене и смилане на рудите, което осигурява ефективно разкриване на рудните минерали, увеличаване производителността и постигане на положителен икономически ефект, с по-ниска себестойност на 1 тон от произведените концентрати.

В настоящата работа се разглеждат резултатите от внедряването на нова, двустадиялна верига на трошене и пресяване на рудите, включваща съвременно оборудване с висока производителност и ниска енергоемкост, заместваща прилаганата тристадиялна схема на трошене в обогатителна фабрика. Остарялото производствено

оборудване води до влошени технологични показатели, пониска производителност и по-високи разходи на обогатителната фабрика.

**Материал и методика**

В обогатителната фабрика, се преработва оловно-цинкова руда със следните показатели - средно съдържание на олово 2.92%, цинк 3.16%, отн. тегло 2.85 g/cm<sup>3</sup> и влажност, варираща от 8 до 9 %. Химичният състав на рудата, постъпваща за преработка в обогатителната фабрика е показан в табл. 1.

Табл.1. Осреднен химичен състав на оловно-цинковата руда, постъпваща за преработка в обогатителната фабрика

Компоненти	Съдържание (%)
Pb	2.92
Zn	3.16
Cu	0.17
S сулфатна	0.10
S сулфидна	4.01
SiO <sub>2</sub>	52.58
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9.58
CaO	7.25
MgO	4.75
Fe	4.25
Mn	0.70
K <sub>2</sub> O	2.75
NaO	0.20
TiO <sub>2</sub>	1.00
Ag	18.0
P	0.08
Ni	0.05
Co	0.002

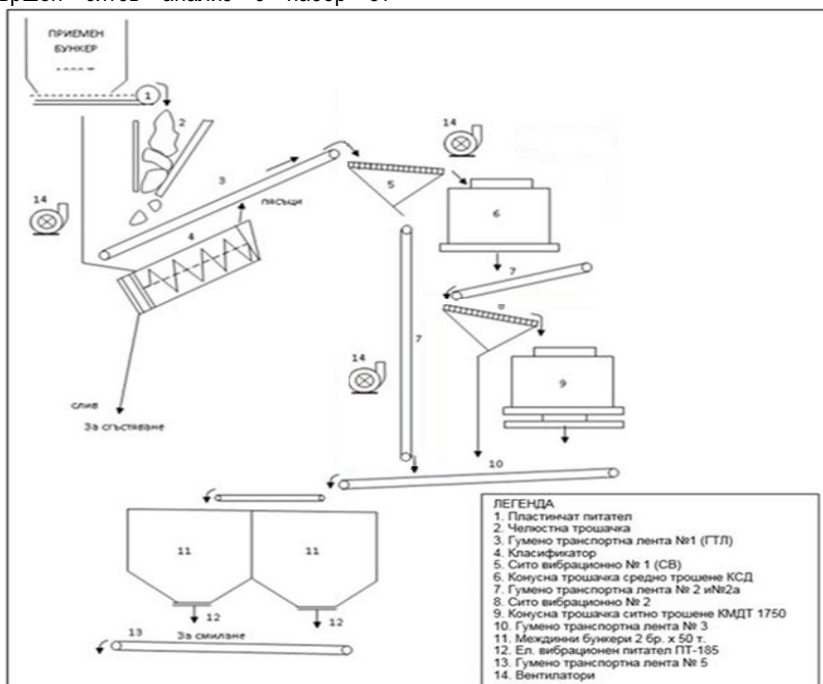
За определяне зърнометричната характеристика на натрошената руда със старата и новата трошачна инсталация е извършен ситов анализ с набор от

лабораторни сита с размери на отворите 40, 25, 20, 12.5, 8, 5 и 2 mm. Зърнометричният анализ е проведен в Лабораторията по Зърнометрична подготовка на суровини на катедра „Обогатяване и рециклиране на суровини“, МГУ “Св. Иван Рилски”.

**Резултати и дискусия**

**Стара трошачна инсталация**

Късовете руда, постъпващи в старата трошачна инсталация имат големина до 400 mm, в единични случаи достигаща 500 mm. Рудата се подлага на 3 стадия на трошене – едро трошене с челюстна трошачка OM 35, с мощност 75 kW; средно трошене с конусна трошачка КСД – 1750 с мощност 160 kW и ситно трошене – с конусна трошачка КМДТ 1750 Т, с мощност 160 kW. Рудата от приемния бункер с вместимост 1000 t се подава за едро трошене посредством пластинчат питател в челюстната трошачка OM 35. Натрошената руда се транспортира с лентов транспортър №1 (ГТЛ) до вибрационно сито № 1. Надситовият продукт се подава за средно трошене в конусна трошачка тип КСД – 1750, с размер на разтоварващия отвор 50 mm, а подситовият продукт чрез лентов транспортър № 3 постъпва в акумулиращи бункери. Натрошената руда се подава на вибрационно сито № 2, като надситовият продукт постъпва за фино трошене в конусна трошачка КМДТ 1750 Т с размери на разтоварващия отвор 18 mm, а подситовият продукт заедно с подситовият продукт от средно трошене чрез ГТЛ № 3 се складира в акумулиращи бункери, захранващи мелничното отделение. Верижна схема на машините и съоръженията в старата трошачна инсталация е представена на фиг. 1.



Фиг. 1. Верижна схема на машините и съоръженията в старата трошачна инсталация

Степента на натрошаване за първия стадий на трошене е 2.0, а за втория и третия стадий, съответно 2.5 и 4.0. Общата степен на трошене или коефициентът на трошене е 20. Ефективността на пресяване в зависимост от характеристиката на рудата е следната:

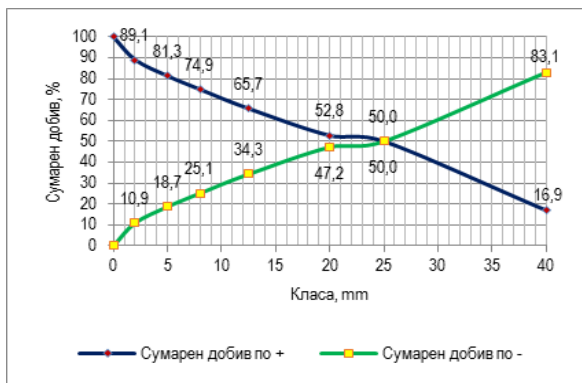
- преди втория стадий на трошене - за класата 50 mm - 70 %; преди третия стадий на трошене – за класата 65 mm - 85 %

Производителността на трошачното отделение е 2000 t/24 h., което показва наличието на известен резерв от мощности за захранване на мелниците с натрошена руда.

Използваното производствено оборудване е физически и морално остаряло и не позволява постигането на оптимален зърнометричен състав на преработваната руда, което води до загубата на метали и увеличени производствени разходи.

Табл. 2. Зърнометричен състав на натрошена руда, стара трошачна инсталация

Класа (mm)	Добив		Сумарен добив (%)	
	g	%	По “+”	По“-“
+40.0	1015	16.9	16.9	100
-40.0 + 25.0	1980	33.1	50.0	83.1
-25.0 + 20.0	165	2.8	52.8	50.0
-20.0 + 12.5	775	12.9	65.7	47.2
-12.5 + 8.0	550	9.2	74.9	34.3
-8.0 + 5.0	385	6.4	81.3	25.1
-5.0 + 2.0	465	7.8	89.1	18.7
-2.0	654	10.9	100	10.9
Общо	5989	100	-	-



Фиг. 2. Зърнометрична характеристика на натрошена руда, стара трошачна инсталация

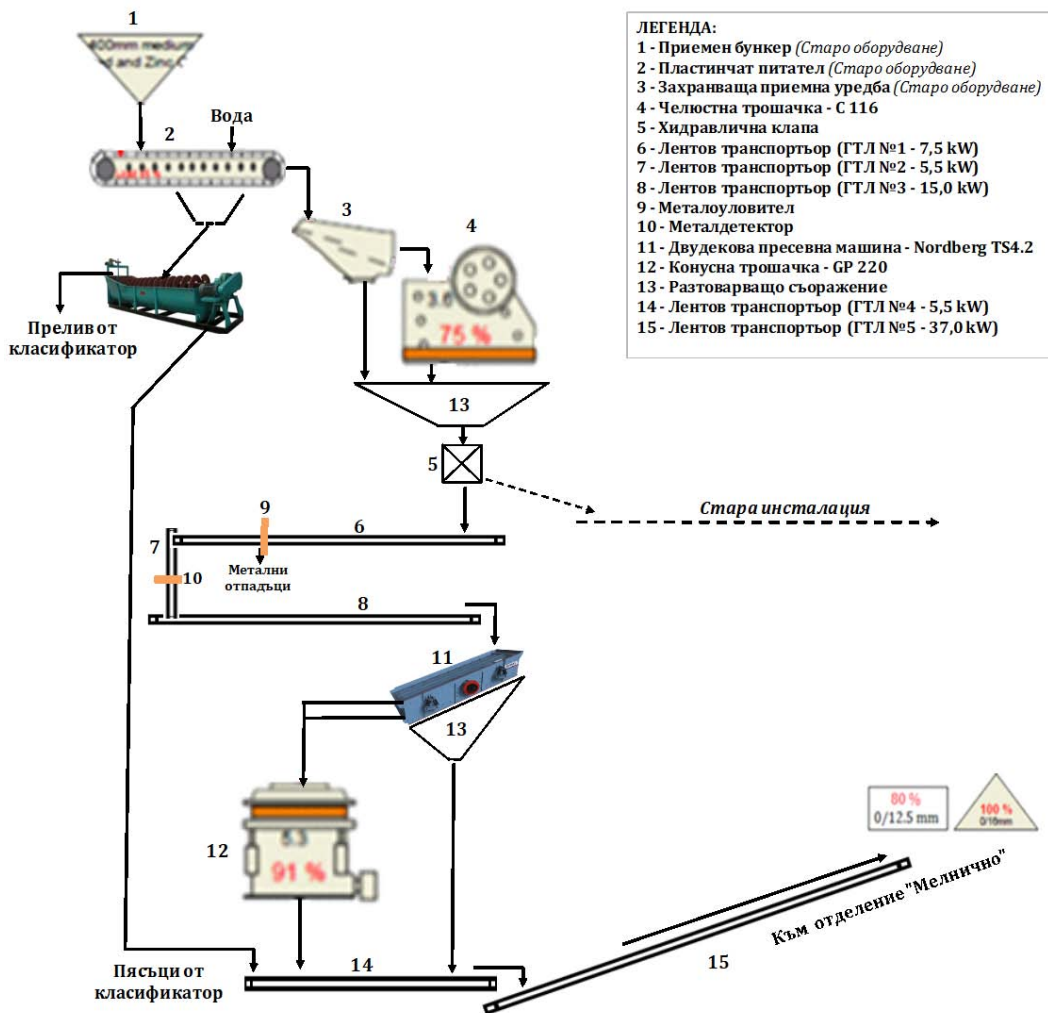
### Нова трошачна инсталация

Оптимизирането на трошачните инсталации се извършва с цел постигането на увеличена производителност, паралелно с осигуряването на необходимите по спецификация размери на натрошената руда, при намаление на производствените разходи (Napier-Mun et al., 2005). За оптимизиране на технологичния режим на процеса трошене в обогатителната фабрика е преминало от тристадиално на двустадиално трошене на рудата, с използването на ново оборудване. Главните

фактори, обуславящи избора на оборудването за трошачните инсталации според Мочев и Григорова (2013, 2014) са следните: физически характеристики на рудата (твърдост, влажност, едрина на късовете, подавани за трошене и др.); производителност на обогатителната фабрика; технически характеристики на трошачките и др. За първият стадий на трошене на рудата е въведена в експлоатация челюстна трошачка Nordberg C 116, а за вторият стадий – конусна трошачка Nordberg GP 220 и двудековата вибрационна пресевна уредба Nordberg TS 4.2. Двете трошачки и вибрационното сито имат иновативен дизайн, висока производителност, устойчивост на износване и лесна поддръжка. Верижна схема на машините и съоръженията в новата трошачна инсталация са представени на фиг. 3.

Исходната руда от приемния бункер, с вместимост 1000 t се подава за трошене в челюстна трошачка Nordberg C 116, посредством пластинчат питател. Челюстната трошачка има захранващ отвор 1150 x 800 mm и разполага с възможност за затваряне челюстите на трошачката до 70 mm. Трошачката има IC 1000 - контролна система, включваща пулт за управление, мониторинг на нивото на материала в трошачката, аналогов сензор и мониторинг на оборотите, на настройките на трошачката, съединителната плоча и температурата на основния лагер. След първия стадий на трошене, рудата се транспортира до двудекова вибрационна пресевна уредба Nordberg TS 4.2 посредством три броя лентови транспортъри (ГТЛ). Двудековата вибрационна пресевна уредба Nordberg TS 4.2 е тип „банан“. Нейната висока ефективност и производителност са резултат от комбинацията на трите различни наклона на дековете и променливото елиптично движение, създадено от вибратори тип MV, монтирани над центъра на тежестта. Пресевната машина е със следните размери: широчина 2445 mm, дължина 6100 mm и пресевна площ 15 m<sup>2</sup>. Благодарение на антиадхезионното разтоварващо съоръжение и гравитацията, рудата от подситовия продукт не полепва по стените на съоръжението и пада върху лентов транспортър, който обединява подситовия продукт и натрошения продукт след втория стадий на трошене. Надситовите продукти от двата дека по гравитационен път постъпват във втория стадий на трошене – ситно трошене в конусна трошачка Nordberg GP 220 с наличие на IC 50C автоматизиран контрол.

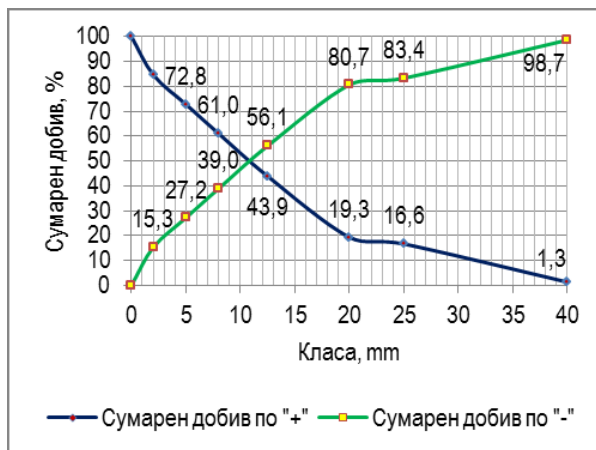
Минималната производителност на трошачката е 144 t/h при настройка на захранващия отвор 14 mm за изходния материал. Натрошената руда от конусната трошачка и подситовият продукт от втория дек на пресевната уредба постъпват на лентов транспортър (ГТЛ) към мелнично отделение. Новата трошачна инсталация дава възможност за постигането на максимално разкриване на рудните фази с размер на частиците 0 до 12,5 mm – 80 % и 0 до 16 mm – 100%. След проведена серия от експерименти за определяне оптималния размер на захранващия отвор на конусната трошачка Nordberg GP 220 е направен ситов анализ на натрошената руда. Получените резултати са представени в табл. 3 и на фиг. 4.



Фиг. 3. Вержна схема на машините и съоръженията в новата трошачна инсталация

Табл. 3. Зърнометричен състав на натрошена руда, нова трошачна инсталация

Класа (mm)	Добив		Сумарен добив (%)	
	g	%	По "+"	По "-"
+40.0	155	1.3	1.3	100
-40.0 + 25.0	1845	15.3	16.6	98.7
-25.0 + 20.0	323	2.7	19.3	83.4
-20.0 + 12.5	2950	24.5	43.9	80.7
-12.5 + 8.0	2067	17.2	61.0	56.1
-8.0 + 5.0	1414	11.8	72.8	39.0
-5.0 + 2.0	1425	11.9	84.7	27.2
-2.0	1845	15.3	100	15.3
Общо	12024	100	-	-



Фиг. 4. Зърнометрична характеристика на натрошена руда, нова трошачна инсталация

**Технико-икономически показатели на новата и старата трошачни инсталации**

- Установява се с около 39.7 % по-висока ефективност на трошене на рудата с новата трошачна инсталация, в сравнение със старата. Класата -16.0 + 0.0 mm натрошена

руда, получавана с новата трошачна инсталация съставлява 68%, докато със старата инсталация тя е около 41% (табл. 2, 3; фиг. 2, 4).

- С новата, автоматизирана трошачна инсталация се постига по-висока производителност с 35.7%. Производителността на новото оборудване е 129.7 t/h, а на старата инсталация – 83.3 t/h. При количество на изходната руда, ежедневно постъпваща за натрошаване около 900 t, необходимото време за натрошаване се съкращава от 8 на 5.5 часа, с въвеждането на новата инсталация.

- Внедреното ново оборудване се характеризира с много по-ниско потребление на електроенергия, като инсталираната мощност е 451 kW, докато старата инсталация има мощност 718 kW. Реализираното редуциране на потребяваната електроенергия е с 37.2%.

- По-високата ефективност на трошене на рудата с въведената нова трошачна схема, оказва благоприятно влияние на следващите процеси по веригата – смилане и флотация, като се увеличава производителността на мелничното отделение, намалява се разходът на мелничния товар (стоманени топки с диаметър  $\varnothing$  100) и се постига по-доброто разкриване на рудните минерали.

## Изводи

Оптимизирането на технологичния режим на трошене на рудите в обогатителните фабрики, с внедряването на ново, съвременно оборудване, води до по-висока ефективност и производителност на процесите смилане и флотация, с подобро извличане на металите, при по-ниски производствени разходи.

## Литература

- Григорова, М. (2020). Геофизични методи при решаване на инженерно-геоложки задачи свързани с повишаване ефективността в условията на открит рудник „Хан Крум“, *Геология и минерални ресурси*, 6-7, 3-9, ISSN 1310-2265.
- Мочев, Д., Григорова, И. (2013). *Зърнометрична подготовка на суровините*. Изд. Къща “Св. Иван Рилски”, 419 стр., ISBN 978-954-353-204-9
- Мочев, Д., Григорова, И. (2014). *Практикум по зърнометрична подготовка на суровините*. Изд. къща “Св. Иван Рилски”, 220 стр., ISBN 978-954-353-248-3
- Мочев, Д., Григорова, И. (2015). *Въведение в теорията и практиката на рудоподготовка и преработка на минерални суровини*. Изд. къща „Св. Иван Рилски“, 418 стр., ISBN 978-954-353-274-2
- Napier-Munn, T. J., Morrell, S., Morrison, R. D., Kojovic, T. (2005). *Mineral Comminution Circuits – Their Operation and Optimization*. JK/MRC, University of Queensland, Brisbane, 335 p.
- Tomova, M. (2023). Possibilities of geophysical methods for monitoring an integrated mine waste facility. *Annual of the UMG “St. Ivan Rilski”, vol. 66 – 66 International Scientific Conference*, 20.10.2023, Sofia, Bulgaria (p.180-185). <https://zenodo.org/records/8334672>.
- Tomova, M. (2023). Geophysical techniques for monitoring of integrated mine waste storage facility: Case study of Southeastern Bulgaria, *The Eurasia Proceedings of Science, Technology, Engineering & Mathematics (EPSTEM)*, 26, (pp. 341-347). <https://doi.org/10.55549/epstem.1409280>



## STRUCTURAL ANALYSIS OF ORIENTED DRILL CORE DATA BY A STEREOGRAPHIC METHOD FOR UNDERGROUND MINING PURPOSES

*Dian Strahilov*

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

**ABSTRACT.** Before starting the progress of any underground works, it is of utmost importance to reliably assess the characteristics of the massif, namely the lithological varieties, the strength of the rocks, hydrogeological conditions, the nature of the discontinued structures, etc. An essential part of this assessment is the study of the discontinuities because, depending on their character and orientation in space in relation to the future mine working, they could pose a direct risk to human life and health and be a significant complication for the work progress. In the current work, this problem is solved by collecting information via a directional drillhole and processing the information by a stereographic method that combines data obtained from surface observations. The data were obtained from an inclined borehole that followed the future capital mine working using the method of measuring auxiliary angles in an oriented core (e.g. Marjoribanks, 2010) and were subsequently processed with the *GEORient* software freely available on the Internet. The decline will be used as the main mine opening. The mine working is an inclined shaft that will act as a capital work (with a long working life) in an underground mine.

**Key words:** Structural analysis, oriented core, inclined mine workings, stereographic projection.

### СТРУКТУРЕН АНАЛИЗ НА ДАННИ ОТ ОРИЕНТИРАНА СОНДАЖНА ЯДКА ЧРЕЗ СТЕРЕОГРАФСКИ МЕТОД ЗА ЦЕЛИТЕ НА ПОДЗЕМНО МИННО СТРОИТЕЛСТВО

*Диан Страхилов*

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

**РЕЗЮМЕ.** Преди стартиране на прокарването на всяка една подземна минна изработка е от изключителна важност надеждното оценяване на характеристиките на масива по протежение на изработката, а именно литоложките разновидности, якостта на скалите, хидрогеоложката обстановка, характера на крехките структури и други. Съществена част от тази оценка е изследването на крехките структури, тъй като в зависимост от характера и ориентацията им в пространството спрямо бъдещата минна изработка, те биха могли да представляват пряка опасност за човешкото здраве и съществена трудност при прокарването на изработката. В тази работа се разглежда решаването на този проблем чрез стереографски метод, който съчетава данни, добити от ориентирана сондажна ядка и повърхностни наблюдения. Данните са добити от наклонен сондаж по протежение на бъдещата минна изработка чрез метода на измерване на спомагателните ъгли в ориентирана ядка (Marjoribanks, 2010) и в последствие са обработени със свободно достъпния в интернет софтуер „GEORient“.

Минната изработка представлява наклонена шахта, която ще играе роля на капитална изработка (с дълъг експлоатационен живот) в подземен рудник.

**Ключови думи:** Структурен анализ, ориентирана ядка, минна изработка, стереографска проекция.

### Въведение

Настоящата работа представя данни от находище „Милин Камък“. Находището попада в ареала на Западното Средногорие, в близост до град Брезник и е част от горнокредния Апусени-Банат-Тимок-Средногорски (ABTS) магматичен и металогенен пояс (Popov et al., 2002). Находището е от епитермален, жилин тип с доказани промишлени количества от сребърно-златна руда. Петрологията, геохимията и минералогията на орудяването са добре проучени (Velinov, 1967; Stoykov et al., 2007; Nikov et al. 2017; Sabeva et al., 2017, Nikolova et al. 2019; Nikolova, 2022). Публикувани са и изследвания, насочени към структурните характеристики на находището, в които се описва тенденцията на рудата да се натрупва в рудни стълбове (Marinov et al., 2018; Marinov et al. 2019) и на база на кинематични индикатори са обяснени факторите отговорни за геометрията на рудните тела (Strahilov et al. 2022).

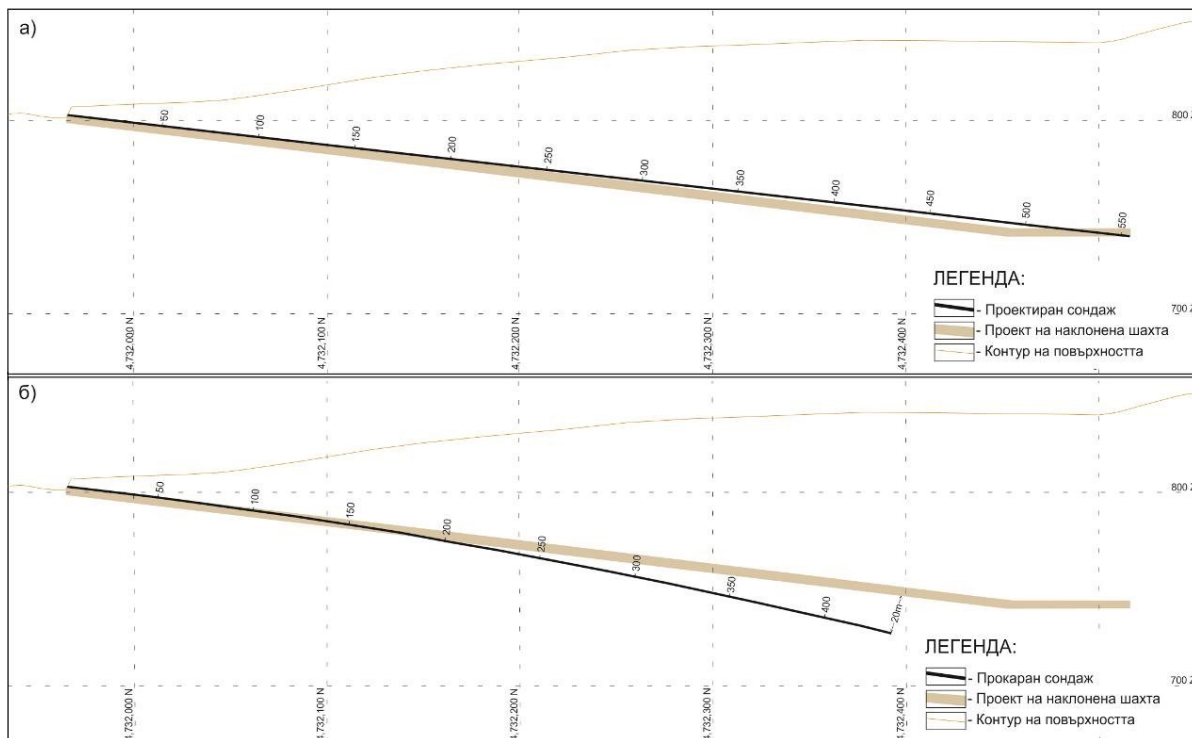
Към днешна дата находището се подготвя за стартиране на добив чрез подземен способ от фирма „Брезник Минералс“, като се очаква в края на тази календарна година да стартират подземни дейности по разкриване на рудата. Първата основна задача е изграждането на подземна минна изработка, която ще

играе роля на втори основен вход/изход в рудника (Наклонена Шахта Запад - НШЗ). Минната изработка представлява наклонена шахта с дължина от 560 метра, азимут  $4^\circ$ , светло сечение  $25 \text{ m}^2$  и наклон от 0 до  $493 \text{ m} - 6,8^\circ$  (12%), а от  $493 \text{ m}$  до края изработката ще бъде с обратен наклон от 3%. Целта на настоящето изследване е да се направи структурна характеристика на масива вместващ НШЗ.

За да бъде максимално точно оценена както структурната характеристика на масива, така и литоложките и геомеханичните му характеристики, които тук няма да бъдат разгледани, по протежение на НШЗ е проектиран наклонен сондаж с дължина 560 m, азимут  $4^\circ$  и наклон  $-6,5^\circ$ . Сондажът е проектиран, така, че устието му да бъде в тавана на минната изработка в нулевият ѝ метър, а забоят му в дъното на изработката в края ѝ (фиг. 1. а).

### Основно изложение

За да бъде информацията от сондажа максимално достоверна, от съществено значение при прокарването му, е той да се изпълни с минимално отклонение от проекта.



Фиг. 1. а) Разрез S-N по протежение на НШЗ с изобразен проектния сондаж по протежението и. б) Разрез S-N по протежение на НШЗ с изобразен прокарения сондаж по протежението и. Изображенията са генерирани в GEOVIA Surpac 2022.

Проследяването на реалното направление на сондажа по време на сондирането се осъществи чрез инклинометрия на всеки 9 метра напредък и визуализиране на сондажа в използвания минен софтуер (GEOVIA Surpac 2022).

На 436-тия метър сондажът бе с отклонение спрямо НШЗ от 20 метра, а ако бе завършен с това направление щеше да има отклонение от крайната си цел 40 метра. Това голямо отклонение и неуспешните опити на сондърският екип да коригират направлението наложи спиране на сондажа (фиг. 1 б).

**Резултати от изследването**

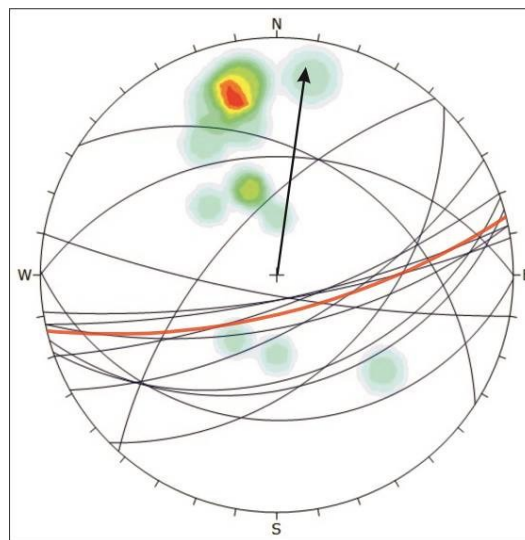
От ориентираната сондажна ядка са измерени общо 149 строежни елемента: 13 разломни плоскости, 77 пукнатини и 59 жили.

Поради сравнително голямата дължина на сондажа, първоначално данните от него бяха изследвани като се разделиха на отделни сегменти, от което се получи еднозначни резултати и това позволи данните от сондажа да се изследват съвкупно. Тъй като от геомеханична гледна точна жилите не са от съществено значение тук те няма да бъдат разгледани.

**Анализ на разломите.** На територията на находището разломните групи доказано са две – север-южна и изток-североизток-запад-северозападна (Strahilov et al., 2022). При анализа на разломите от сондажа се констатира само изток-североизток-запад-северозападна разломна система (фиг. 2).

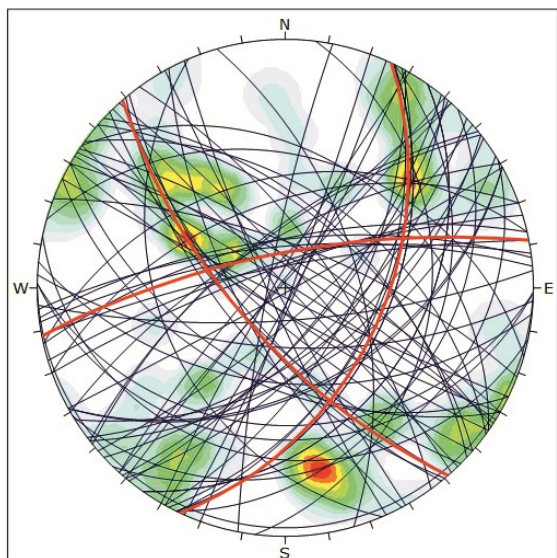
Това се обяснява със северното направление на сондажа, което на практика е успоредно на север-южната разломна система и по този начин прави много трудно установяването ѝ. Това, че разломи от тази система не са отчетени в сондажната ядка не отхвърля съществуването

им. На база на теренните наблюдения, тя със сигурност трябва да се очаква и да се вземе предвид.



Фиг. 2. Стереограма със следите на всички 13 разлома измерени в сондажната ядка. С червена линия е изобразен техният максимум (страна и наклон 166/75), а с черна стрелка е обозначена ориентацията на НШЗ. Долна полусфера, равноъгълна проекция.

**Анализ на пукнатините.** Разкритите пукнатини от сондажа имат ясна статистическа групировка в три посоки: североизток-югозапад (със страна и наклон 117/47), северозапад-югоизток (със страна и наклон 230/76) и изток-североизток-запад-югозапад (със страна и наклон 348/74) (фиг. 3). От общата стереограма на пукнатините се вижда, че наклоните са стръмни до вертикални, но се срещат и полегати пукнатини с наклон от около 30° до почти субхоризонтални потъващи към юг.



Фиг. 3 Стереограма със следите на всички 77 измерени пукнатини от сондажа и нанесени с червени линии следите на образуваните три максимума – 117/47, 230/76 и 348/74. Долна полусфера, равноъгълна проекция.

Съгласно добитите данни от изпълнения сондаж и наличните по-стари проучвателни сондажи от геоложкия профил, се изготви геоложки разрез по протежението на изработката (фиг. 4).

### Дискусия

Съставеният разрез предоставя лесно и бързо разбираема информация за литоложкия състав, през който ще премине НШЗ, наличието на интензивно променени хидротермални зони, характеризиращи се с високо съдържание на глинеста компонента, в които масивът е със значително занижена якост (зоните на аргилизация), локализиране на тектонските зони и по-големите разломни структури.

**Разломи.** Групата на север-южните разломи най-вероятно представя съвременните разломни движения (млади активни разломи) демонстрирани в скорешни изследвания на Димитров и Наков (2020) чрез GPS измервания на преместванията. Север-южната посока на движенията е

констатирана и от формата на кинематичният тензор, получен при неотдавнашен кинематичен анализ за територията на находището (Strahilov et al., 2022). Така север-южната система би следвало да се счита за най-опасна, поради неблагоприятното си разположение спрямо посоката на НШЗ и възможността от движения при евентуален сеизмичен импулс. Вероятно напречното разместване пък се обуславя от разломите с посока изток-североизток-запад-югозапад, които пресичат изработката и най-вероятно представляват стари реактивирани сръзвания.

**Пукнатини.** От минно-техническа гледна точка пукнатините формират блокове с преобладаваща пирамидална форма и остър връх на пирамидата нагоре и основа надолу (фиг. 5), които ще висят в тавана на изработката.

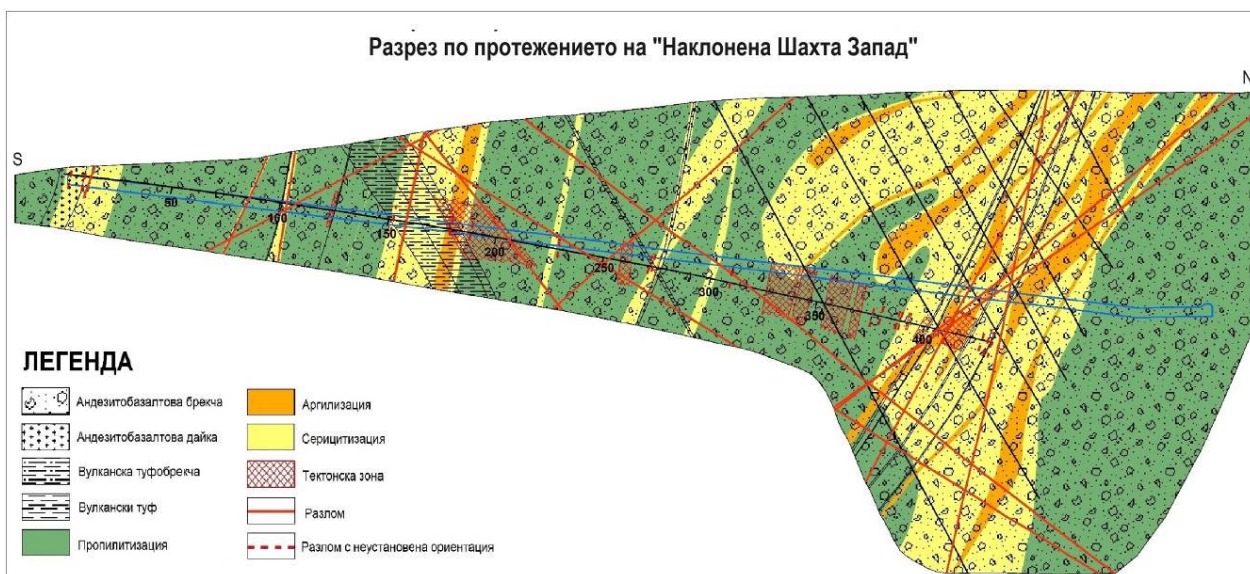
Установените пукнатини със стръмни наклони ще създават висящи пластини в тавана и стените на НШЗ.

От установените 3 пукнатинни системи, най-неблагоприятно е разпространението на североизток-югозападна система поради сравнително надлъжната ѝ посока спрямо НШЗ.

Ъглите, които пукнатините системи сключват с наклонената шахта са:

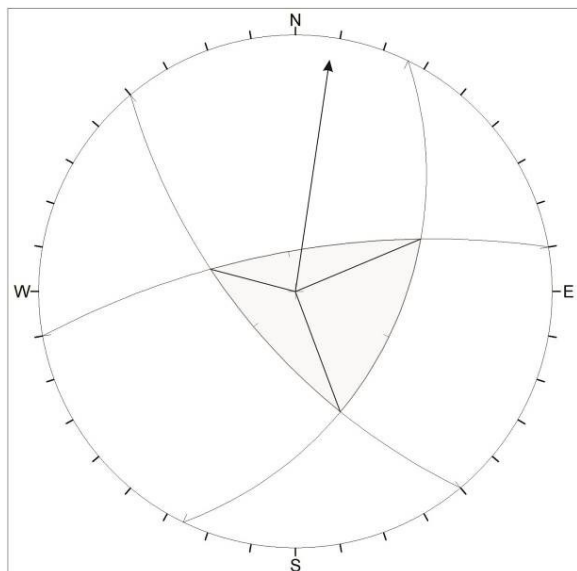
- североизток-югозападна система - 45°
- северозапад-югоизток - 51°
- изток-североизток-запад-югозапад - 70°

Скалите, през които преминава сондажът, са предимно андезитобазалтови туфобрекчи. Единствено в участъка между 165 и 182 метър, сондажът преминава през участък от слоисти туфи, в които не е възможно ориентирането на ядката и добиване на информация от тях. В повърхностни разкрития, този участък от туфи е добре изучен и на места систематичната напуканост, при пресичането си със слоистостта, образува пирамидални и призматични блокове. Това е проява на типично клиновидно обрушаване (wedge sliding) като формата и геометрията на клиновете може да се види от диаграмите съставени за всеки един от наблюдаваните клинове (фиг. 6).

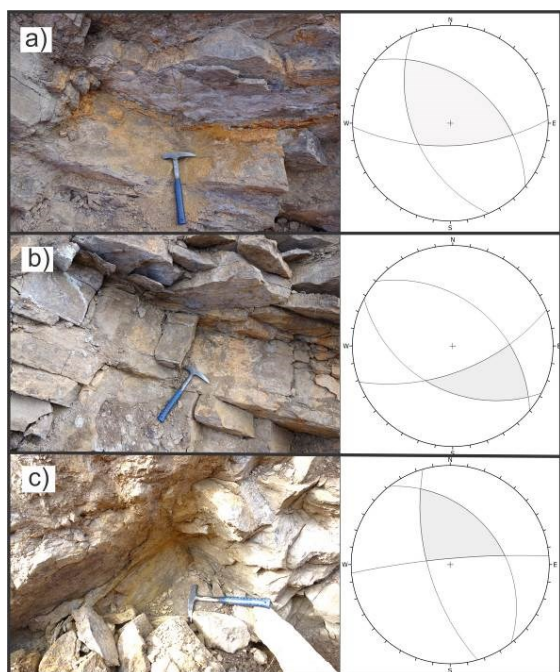


Фиг. 4 Разрез по протежението на бъдещата Наклонена Шахта Запад.





Фиг. 5 Стереограма с нанесени полюсите на трите максимума на пукнатинните системи от фигура 3, с изчертан клин, който образуват. С черна стрелка е обозначена ориентацията на НСЗ.



Фиг. 6 Фотографии на наблюдавани призматични клинове в туфите и стереограма към всеки с нанесени следите на структурите, които образуват наблюдавания клин. а) Слоистост 040/42, пукнатини 178/64 и 248/48. б) Слоистост 040/42, пукнатини 159/61 и 208/43. в) Слоистост 062/40, пукнатини 355/83 и 254/65.

Съществува чисто гравитационен сценарий на активация по гореизброените плоскости.

При гравитационния сценарий движението на блоковете между пукнатините ще се възпрепятства от триенето на повърхностите в отгоре-лежащите скали. Това задвижване е ограничено от теглото на скалите и от ъгъла на пукнатинно триене. То може допълнително да се стабилизира чрез наситено анкерирание.

Гравитационният натиск е неизбежен и постоянен, като нараства с времето, поради деградацията на скалите над минната изработка.

**Благодарности.** Благодарности към фирма „Брезник Минералс“ за предоставените данни и съгласието за публикуването им.

## Литература

- Dimitrov, N., R. Nakov. (2020). Recent GPS results on the geodynamics of the area around Sofia (Central Western Bulgaria). – Rev. Bulg. Geol. Soc., 81, 3, 241–243. doi 10.3390/app12052682
- Hikov, A., N. Velinova, C. Lerouge, A. Kunov. (2017). Geochemistry of advanced argillic altered rocks in the area of Breznik, Western Srednogorie Unit (Bulgaria). – Geol. Balcanica, 46, 1, 93–108. doi 10.52321/GeolBalc.46.1.93
- Popov, P., T. Berza, A. Grubic, I. Dimitru. (2002). Late Cretaceous Apuseni-Banat-Timok-Srednogorie (ABTS) magmatic and metallogenic belt in the Carpathian-Balkan Orogen. – Geol. Balcanica, 32, 145–163. doi 10.52321/GeolBalc.32.2-4.145
- Sabeva R., V. Mladenova, A. Mogessie. (2017). Ore petrology, hydrothermal alteration, fluid inclusions, and sulfur stable isotopes of the Milin Kamak intermediate sulfidation epithermal Au-Ag deposit in Western Srednogorie. – Bulgaria Ore Geology Reviews, 88, 400–415. doi 10.1016/j.oregeorev.2017.05.013
- Stoykov, S., S. Strashimirov, R. Moritz, D. Dimitrov, J. Todorov. (2007). Mineral composition of the Breznik-Bardoto Au epithermal ore occurrence (preliminary data). – Annual of the University of Mining and Geology St Ivan Rilski, 50, 1, 117–122.
- Strahilov, D., Doichev, P., Dimitrov, I. (2022). Ore shoots formation in a sinistral strike-slip structural environment interpreted from the map of the Au-Ag Milin Kamak deposit in the Breznik area, Southwest Bulgaria. – Rev. Bulg. Geol. Soc., 83, 3, 131-134. doi 10.52215/rev.bgs.2022.83.3.131
- Velinov, I. (1967). Propylites and alunite quartzites in the region of Breznik. – Review of the Geological Institute, Bulgarian Academy of Science, ser. Geochemistry, Mineralogy and Petrology, 16, 205–220.
- Nikolova, D. (2022). Mineral associations in the geochemical halos of Milin Kamak ore deposit, Bulgaria. – Rev. Bulg. Geol. Soc., 83, 3, 31-34. doi 10.52215/rev.bgs.2022.83.3.31
- Nikolova, D., S. Dobrev, K. Ruskov. (2019). Mineralization in Ore Zone 1, Milin Kamak deposit, Western Srednogorie, Bulgaria. – Journal of Mining and Geological Sciences, 62, 1, 11–16. doi 10.52215/rev.bgs.2022.83.3.31
- Marinov I., K. Popov, K. Ruskov, D. Nikolova. (2019). Factor analysis of the geochemical associations in Milin Kamak ore deposit, Bulgaria. – Rev. Bulg. Geol. Soc., 80, 3, 142–144.
- Marinov, I, N. Temelakiev, P. Doychev, K. Popov. (2018). Фактори, контролиращи рудообразователните процеси в златно-сребърно находище Милин камък, Западно Средногорие, България. – Rev. Bulg. Geol. Soc., 79, 3, 125–126.
- Marjoribanks, R. (2010). *Geological Methods in Mineral Exploration and Mining* (2nd ed.). Springer-Verlag Berlin Heidelberg. doi 10.1007/978-3-540-74375-0

# ADVANCED OPTIMISATION STRATEGIES FOR ROAD CONSTRUCTION IN OPEN PITS: AN APPROACH FOCUSING ON GEOTECHNICAL STABILITY

*Danail Terziyski, Simeon Asenovski, Ivaylo Koprev*

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

**Abstract.** The construction and maintenance of mine roads are critical to ensuring the efficiency, safety, and cost-effectiveness of mining operations. This paper presents an advanced mathematical framework that integrates effective stress principles, dynamic loading conditions, soil anisotropy, non-linear behavior, and time-dependent changes to provide a comprehensive assessment of soil stability during the construction of these facilities.

By combining effective stress with the Mohr-Coulomb failure criterion, the framework accounts for both inherent soil properties and the influence of pore water pressure, leading to more precise shear strength calculations. The Modified Cam Clay model addresses soil anisotropy and nonlinear behavior, enhancing the prediction accuracy of soil responses under different loading conditions. Incorporating a dynamic factor ( $D_t$ ) allows for realistic assessments of stress due to heavy machinery, improving the evaluation of long-term stability and safety.

**Key words.** Mine roads construction, Efficiency and safety, Non-linear behavior

## УСЪВЪРШЕНСТВАНИ СТРАТЕГИИ ЗА ОПТИМИЗАЦИЯ ЗА СТРОИТЕЛСТВО НА ПЪТИЩА В ОТКРИТИ РУДНИЦИ: ПОДХОД С АКЦЕНТ ВЪРХУ ГЕОТЕХНИЧЕСКАТА СТАБИЛНОСТ

*Данаил Терзийски, Симеон Асеновски, Ивайло Копрев*  
*Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700, София*

**Резюме.** Изграждането и поддръжката на руднични пътища са от решаващо значение за осигуряване на ефективността, безопасността и рентабилността на минните операции. Настоящата работа представя усъвършенствана математическа рамка, която интегрира принципи на ефективното напрежение, условия на динамично натоварване, анизотропия на почвата, нелинейно поведение и зависимости от времето промени, за да предостави цялостна оценка на стабилността на почвата при изграждането на такава инфраструктура.

Чрез комбиниране на ефективното напрежение с критерия на Мор-Кулом се отчитат както присъщите свойства на почвата, така и влиянието на водното налягане в порите, което води до по-прецизни изчисления на якостта на срязване. Модифицираният модел на Кам-Клей се свързва с анизотропията на почвата и нелинейното поведение, като повишава точността на прогнозиране на реакциите на почвата при различни условия на натоварване. Включването на динамичен фактор ( $D_t$ ) позволява реалистични оценки на напреженията, дължащи се на тежки машини и подобрява оценката на дългосрочната стабилност и безопасност.

**Ключови думи:**

## Introduction

Open mine road construction is a crucial element in the mining industry, playing a pivotal role in ensuring the efficient and safe transportation of heavy machinery, personnel, and extracted materials. The quality and durability of these roads directly impact operational efficiency, safety standards, and overall productivity. As mining operations continue to expand, there is a pressing need to develop and implement advanced optimisation strategies that can enhance the construction and maintenance of this essential infrastructure. This paper focuses on a single strategy: comprehensive geotechnical stability analysis, presenting new mathematical models to support this approach.

The geotechnical stability of open mine roads involves understanding and managing the complex interactions between soil and rock properties, loading conditions, and environmental factors. Traditional approaches to geotechnical analysis have relied on empirical methods and basic theoretical models, such as the effective stress principle and the Mohr-Coulomb failure criterion. While these methods provide a foundation, they often fall short in addressing the dynamic and time-dependent behaviours encountered in real-world mining scenarios.

To address these challenges, we propose an enhanced mathematical framework that integrates several advanced concepts:

1. **Dynamic Loading Conditions:** Mining operations involve significant dynamic loads from heavy machinery and equipment. Traditional static models do not adequately account for these effects. By incorporating a dynamic load

factor ( $D_t$ ), we can better predict the stresses and potential failure modes under operational conditions.

2. **Soil Anisotropy and Nonlinear Behavior:** Soils often exhibit anisotropic and non-linear behaviour, particularly under varying load conditions. Using advanced models, such as the Modified Cam Clay model, allows us to capture these complex behaviors more accurately.
3. **Time-Dependent Behaviour (Creep and Consolidation):** Soil properties and stability can change over time due to consolidation and creep. Traditional models often ignore these effects, leading to inaccurate long-term predictions. Our framework includes equations for primary consolidation and secondary creep, providing a more comprehensive analysis of long-term stability.
4. **Integration of Effective Stress and Dynamic Factors:** By combining the effective stress principle with dynamic loading conditions, we create a more robust model for evaluating the stability of mine roads. This integrated approach allows for more accurate predictions of failure under both static and dynamic conditions.

The novelty of this approach lies in its comprehensive integration of these advanced concepts into a single mathematical framework tailored specifically for open mine road construction. By leveraging numerical simulations and finite element methods (FEM), we can simulate stress distributions and deformations under various conditions, providing more reliable and actionable insights for road design and maintenance.



## Comprehensive Geotechnical Stability Analysis

A detailed site investigation is crucial to understanding the geotechnical properties of the soil and rock in the mining area. This involves the following:

Geotechnical investigations begin with conducting surveys and sampling to collect data on soil composition, rock properties, and groundwater conditions. This information forms the foundation of any geotechnical analysis and is critical for understanding the site-specific challenges that might affect road stability. The next step involves performing laboratory tests to determine essential soil parameters such as cohesion ( $c$ ), internal friction angle ( $\phi$ ), and unit weight ( $\gamma$ ). These parameters are crucial for assessing the shear strength and compressibility of the soil. Additionally, field tests, like Standard Penetration Tests (SPT) and Cone Penetration Tests (CPT), are employed to obtain in-situ soil strength parameters, providing a more accurate representation of the soil's behavior under actual field conditions.

To evaluate the stability of open mine roads, we use established mathematical models that incorporate effective stress, dynamic loading conditions, soil anisotropy, non-linear behaviour, and time-dependent changes.

### Effective Stress Principle:

The effective stress principle is fundamental in soil mechanics and plays a vital role in determining soil strength. The effective stress ( $\sigma'$ ) is defined as the difference between total stress ( $\sigma$ ) and pore water pressure ( $u$ ) (Lade & Boer, 1997):

$$\sigma' = \sigma - u \quad (1)$$

This equation indicates that the soil's ability to resist deformation and failure is directly influenced by the pore water pressure. Higher pore water pressures can reduce the effective stress, leading to potential instability.

### Mohr-Coulomb Failure Criterion:

The Mohr-Coulomb failure criterion is used to describe the failure condition of soils under shear stress. It combines the effects of cohesion and internal friction angle to define the shear strength ( $\tau$ ) of the soil (Heyman, 1972; Labuz and Zang, 2012):

$$\tau = c + \sigma' \tan \phi = c + (\sigma - u) \tan \phi \quad (2)$$

### Anisotropy and Non-Linear Soil Behaviour:

Soils often exhibit anisotropic and non-linear behaviour, particularly under varying load conditions. The Modified Cam Clay model is an advanced soil model that accounts for this complex behaviour. The yield function for this model is given by Foriero et al. (2015):

$$F = \frac{q^2}{M^2} + p(p - p_c), \quad (3)$$

where:

- $q$  is Deviatoric stress,
- $M$  - Slope of the critical state line,
- $p$  - Mean effective stress,
- $p_c$  - Preconsolidation pressure.

This equation provides a more accurate representation of the soil's response to different loading conditions, considering both anisotropic and non-linear properties.

### Dynamic Loading Conditions:

In mining operations, roads are subjected to dynamic loads from heavy machinery. These dynamic loads can significantly impact the stress distribution within the soil. To account for this, a dynamic factor ( $D_f$ ) is introduced into the stress calculations (Kansake et al., 2023):

$$\sigma_d = \sigma \cdot D_f, \quad (4)$$

where  $\sigma_d$  is the dynamic stress.

The dynamic Factor of Safety (FoS) can then be expressed as:

$$FoS_d = \frac{\tau}{\sigma_d} = \frac{c + (\sigma - u) \tan \phi}{\sigma \cdot D_f} \quad (5)$$

This equation helps in assessing the stability of the road under operational conditions by incorporating the effects of dynamic loading.

### Time-Dependent Behaviour (Creep and Consolidation):

Soil properties and stability can change over time due to consolidation and creep. This time-dependent behaviour is crucial for long-term stability analysis.

#### Primary Consolidation:

The settlement due to primary consolidation is given by:

$$S_c = \frac{H \cdot \Delta \sigma'}{E_s} \cdot \log \left( \frac{\sigma' + \Delta \sigma'}{\sigma'} \right), \quad (6)$$

where:

- $S_c$  is settlement due to consolidation,
- $H$  - Thickness of the compressible layer,
- $\Delta \sigma'$  - Change in effective stress,
- $E_s$  is consolidation modulus.

#### Secondary Creep:

The strain due to secondary creep is given by:

$$\epsilon_c = \alpha_c \cdot \log \left( \frac{t}{t_0} \right), \quad (7)$$

where:

- $\epsilon_c$  is Creep strain,
- $\alpha_c$  - Creep coefficient,
- $t$  - Time,
- $t_0$  is reference time.

These equations provide a framework for predicting long-term changes in soil properties and their impact on road stability.

## Conclusion

This paper presents a mathematical framework for the geotechnical stability analysis of open mine roads by integrating

effective stress principles, dynamic loading conditions, soil anisotropy, non-linear behaviour, and time-dependent changes.

The effective stress principle, combined with the Mohr-Coulomb failure criterion, allows for precise calculations of shear strength, accounting for variations in pore water pressure. The Modified Cam Clay model addresses the limitations of traditional isotropic assumptions by considering the anisotropic and non-linear behavior of soils. This leads to more accurate predictions of soil response under different loading conditions and better identification of potential failure mechanisms.

Incorporating dynamic loading conditions through a dynamic factor ( $D_f$ ) provides a realistic assessment of stresses from heavy machinery operations. The dynamic Factor of Safety (FoS) model enhances the prediction of failures under operational conditions. Additionally, modeling time-dependent behaviour, such as primary consolidation and secondary creep, offers a framework for evaluating long-term changes in soil properties and their impact on road stability.

The proposed framework marks an improvement over traditional methods by offering a detailed and accurate understanding of soil behaviour. This leads to safer and more efficient designs for open mine roads, enhancing operational efficiency and safety. Future research can refine these models further and explore new factors that may impact soil stability,

ensuring continued advancements in the field of geotechnical engineering for mining operations.

## References

- Foriero, A., Tsafack, J., & Doucet, F. (2015). A New Model for the Cross Anisotropic Nonlinear Elastic Behaviour of Unbounded Soils for Road Pavements. *Indian Geotech J* 45, 412–430. <https://doi.org/10.1007/s40098-014-0126-2>
- Heyman, J., (1972) Coulomb's Memoir on Statics. Cambridge University Press, London.
- Labuz, J.F., Zang, A. (2012). Mohr–Coulomb Failure Criterion. *Rock Mech Rock Eng* 45, 975–979. <https://doi.org/10.1007/s00603-012-0281-7>.
- Lade, P. & Boer, R., (1997). The concept of effective stress for soil. *Geotechnique*. 47. 10.1680/geot.1997.47.1.61.
- Kansake, B.A., Frimpong, S., Nyaaba, W., Ateng, I. (2023). Three-Dimensional Finite Element Modeling of Haul Road Response to Ultra-Large Dump Truck Dynamic Loading. *Mining, Metallurgy & Exploration* 40, 315–335. <https://doi.org/10.1007/s42461-022-00725-7>.

# ON STRESSES AROUND A TUNNEL PASSING THROUGH TWO ROCK LAYERS

Violeta Trifonova-Genova, Gergana Tonkova

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia, E-mail: violeta.trifonova@yahoo.com, gtonkova@mgu.bg

**ABSTRACT:** The article deals with the issue of determining the stresses around a circular tunnel. It passes through two rock layers. Each of them has an arbitrarily located plane of isotropy. The boundary plane between them is inclined to the axis of the tunnel. Furthermore, the plane is parallel to the horizontal axis of the circular cross-section of the tunnel. The specified class of tasks is solved with the complex potential theory and an approach from the mechanics of layered media. The expressions for the stresses in the two layers have been derived.

The results are applied to a real rock mass consisting of two transversely isotropic layers. The stresses at points of the circular section of the tunnel in the two layers were obtained. Two tangential normal stress diagrams are given.

**Key words:** complex potential theory, mechanics of layered media, tunnel.

## ВЪРХУ НАПРЕЖЕНИЯ ОКОЛО ТУНЕЛ ПРЕМИНАВАЩ ПРЕЗ ДВА СКАЛНИ ПЛАСТА

Виолета Трифонова-Генова, Гергана Тонкова

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

**РЕЗЮМЕ:** В статията се разглежда въпроса за определяне на напреженията около кръгъл тунел. Той преминава през два скални пласта. Всеки от тях притежава произволно разположена равнина на изотропия. Граничната равнина между пластове е наклонена спрямо оста на тунела. Освен това, равнината е успоредна на хоризонталната ос на кръговото напречно сечение на тунела. Указаният клас задачи се решава с комплексна потенциална теория и подход от механика на напластените среди. Получени са изразите за напреженията в двата пласта. Резултатите са приложени за реален скален масив, състоящ се от два трансверзално изотропни пласта. Получени са напреженията в точки от кръговото сечение на тунела в двата пласта. Дадени са две диаграми на тангенциалните нормални напрежения.

**Ключови думи:** комплексна потенциална теория, механика на напластените среди, тунел.

## Introduction

In general, the earth mass is an environment consisting of different layers. Each of them has different physical and technical properties. They are different in the layering plane and in a direction perpendicular to it. The stresses in the vicinity of a tunnel driven into the rock mass are determined by the methods of mechanics of layered media and the complex potential theory (Mishkelishvili, 1953; Lu et al., 2024).

Solutions to problems in which the boundary planes between layers are parallel to the tunnel axis are described in (Trifonova-Genova et al., 2023). These tasks are of two types. The first type covers tasks in which the rock mass consists of thin and parallel layers. In the second type of task, the layers around the tunnel are steep and thick. In the article cited above, a method for determining the stresses in a rock mass consisting of two isotropic layers is proposed. The boundary plane between them is inclined to the axis of the tunnel and parallel to the horizontal axis of its cross section.

The present work aims to extend the method described above. Each layer has a plane of isotropy arbitrarily located relative to the boundary plane.

## Methods

### 1. Formulation of the problem

A horizontal circular tunnel with a radius  $R$  is driven at a great depth  $H$ . It goes through two layers.

Part of the rock massif around the tunnel is considered, which has the shape of a cube (Fig.1). The stresses on the walls of the cube are equal to the stresses in the undisturbed rock mass. The boundary plane between the layers is inclined to the

axis of the tunnel. Moreover, it is parallel to the horizontal axis of the tunnel cross-section. This plane divides the cube into two parts. Each part has a plane of isotropy that is randomly located relative to the sides of the cube.

### 2. Method for determination of stresses

The following three-stage approach is used to determine the stresses in each layer:

During the *first stage*, layers with different characteristics in the plane of isotropy and in a direction perpendicular to it are replaced by layers that are isotropic.

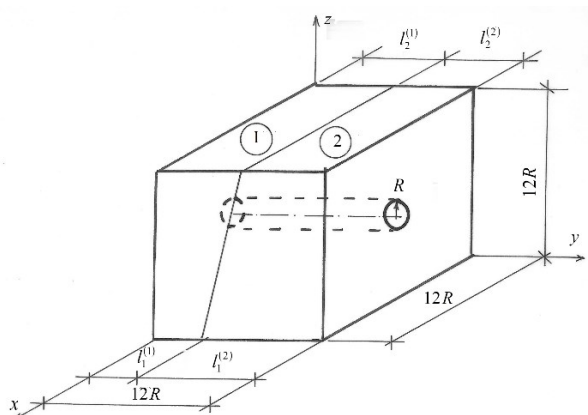


Fig. 1. A tunnel passing through two layers

The mechanical characteristics of these layers are determined in two ways. According to the first way (Kurleniya et al., 1983), these characteristics are:

$$E^{(m)} = \sqrt[3]{E_1^{(m)} E_1^{(m)} E_2^{(m)}}; \mu^{(m)} = \sqrt[3]{\mu_1^{(m)} \mu_1^{(m)} \mu_2^{(m)}}. \quad (1)$$

Here  $E_1^{(m)}$  is Young's modulus and  $\mu_1^{(m)}$  is Poisson's ratio in the plane of isotropy by layer  $m$  ( $m=1,2$ ). In a plane perpendicular to this plane the characteristics are  $E_2^{(m)}$  and  $\mu_2^{(m)}$ .

The second way to determine the mechanical characteristics in isotropic layers is given in (Marino et al., 1972):

$$E^{(m)} = \left[ \frac{1}{2} \left( \frac{1}{E_1^{(m)}} + \frac{1}{E_2^{(m)}} \right) \right]^{-1}; \mu^{(m)} = \mu_1^{(m)}. \quad (2)$$

These formulae are applied for a specific rock mass in (Tonon et al., 2003).

In the *second stage*, the isotropic layers are replaced by an equivalent uniform homogeneous isotropic layer. It has the following characteristics (Trifonova-Genova, 1991):

$$E^{(o)} = \frac{\sum_{m=1}^2 E^{(m)} V_m}{\sum_{m=1}^2 V_m}; \mu^{(o)} = \frac{\sum_{m=1}^2 \mu^{(m)} V_m E^{(m)}}{\sum_{m=1}^2 V_m E^{(m)}}; \quad (3)$$

$$\gamma^{(o)} = \frac{\sum_{m=1}^2 \gamma^{(m)} V_m}{\sum_{m=1}^2 V_m}, \lambda^{(o)} = \frac{\mu^{(o)}}{1 - \mu^{(o)}}.$$

The characteristics involved in these expressions are

for layer  $m$ :  $\gamma^{(m)}$  - volumetric weight;

$E^{(m)}$  - Young's modulus;

$\mu^{(m)}$  - Poisson's ratio;

in the uniform medium:  $\gamma^{(o)}$  - volumetric weight;

$E^{(o)}$  - Young's modulus;

$\mu^{(o)}$  - Poisson's ratio;

$\lambda^{(o)}$  - side pressure coefficient.

In dependencies (3), the volumes of the layers are determined by the following expression:

$$V_m = 72 [l_1^{(m)} + l_2^{(m)}] r^2; m = 1 \div 2. \quad (4)$$

To determine the stresses in the uniform layer, the calculation scheme is drawn up. It is a square with a side  $12R$  (Fig. 2). The vertical load on the square is  $Q = \gamma^{(o)}H$ , but  $\lambda^{(o)}Q$  is the horizontal load. The stresses in the medium are plotted in a polar coordinate system ( $Or\theta$ ). Angle  $\theta$  is measured from axis  $Z$  to axis  $x$ . The radius vector of a point from the center is  $r$ .

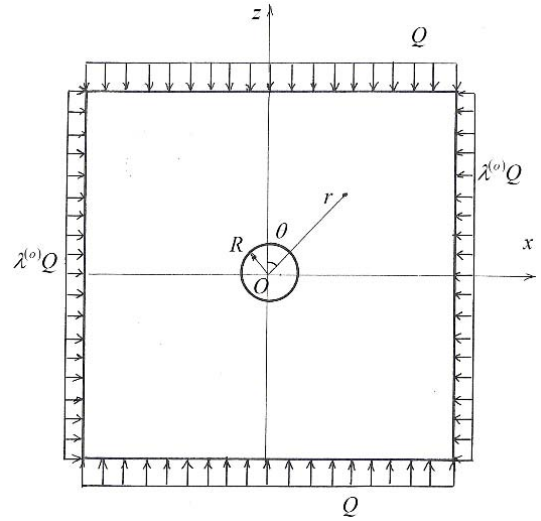


Fig. 2. Calculation scheme

In the *third stage*, the uniform isotropic medium is replaced by a layered medium. The stresses in each layer are determined by two conditions. The first condition describes the balance of forces, and the second equalises the relative deformations of the contact between the two layers. This results in a system of four equations (Trifonova-Genova et al., 2023). Along the contour of the opening, this system acquires the form:

$$\sigma_{\theta}^{(1)} V_1 + \sigma_{\theta}^{(2)} V_2 = \sigma_{\theta}^o V; \quad (5)$$

$$e_2 \sigma_{\theta}^{(2)} - e_1 \sigma_{\theta}^{(1)} = 0,$$

where

$$e_k = a_{11}^{(m)} - \frac{[a_{13}^{(m)}]^2}{a_{33}^{(m)}}; a_{13}^{(m)} = \frac{\mu^{(m)}}{E^{(m)}}; a_{11}^{(m)} = a_{33}^{(m)} = \frac{1}{E^{(m)}}; m=1,2; k=1,2.$$

From the solution of (5), the stresses in the two layers are obtained:

$$\sigma_{\theta}^{(1)} = \frac{e_2 V}{\Delta} \sigma_{\theta}^{(o)}; \sigma_{\theta}^{(2)} = \frac{e_1 V}{\Delta} \sigma_{\theta}^{(o)}, \quad (6)$$

where

$$\Delta = V_1 e_2 + V_2 e_1.$$

The tangential normal stresses in the generalised isotropic medium have the form:

$$\sigma_{\theta}^o = -Q(\sigma_{\theta,1} - \sigma_{\theta,2} \cos 2\theta), \quad (7)$$

where

$$\sigma_{\theta,1} = 2\lambda_1; \sigma_{\theta,2} = 4\lambda_2; \lambda_1 = \frac{1 + \lambda^{(o)}}{2}; \lambda_2 = \frac{1 - \lambda^{(o)}}{2}.$$

**3. Numerical example**

A tunnel with a circular cross-section ( $R = 1,5m$ ) crosses two transversely isotropic layers (Fig. 1). It was driven to a depth of  $H = 300m$ . The Young’s modulus and the Poisson’s ratio in the layers are given in table 1.

Table 1. Characteristics of transversely isotropic layers

m	$E_1^{(m)}$	$E_2^{(m)}$	$\mu_1^{(m)}$	$\mu_2^{(m)}$
multiplier	$10^3$	$10^3$		
unit	MPa	MPa		
1	0.17	0.113	0.1091	0.2834
2	0.8601	0.2867	0.1623	0.502

Characteristics of the uniform isotropic layers according to (1) and characteristics of the uniform medium according to (3) were calculated. These parameters and bulk weights are listed in Table 2.

Table 2. Characteristics of uniform layers and uniform media

m	$E^{(m)}$	$\mu^{(m)}$	$\gamma^{(m)}$
multiplier	$10^3$		$10^{-2}$
unit	MPa		MN/m <sup>3</sup>
1	0.148	0.15	0.28
2	0.595	0.237	0.25
o	0.416	0.202	0.262

The dimensions of the layers are given in Table 3.

Table 3. Layer sizes

$i$	$l_1$	$l_2$
multiplier		
Unit	m	m
1	5.4	9.0
2	12.6	9.0

The normal tangential stresses in two layers,  $\sigma_{\theta}^{(1)}$  and  $\sigma_{\theta}^{(2)}$ , are determined according to (6). The diagrams of these stresses are symmetrical around the vertical and horizontal axis of the circular cross-section of the tunnel. The results are referred to the stress in the undisturbed medium  $Q$ . These stresses are calculated for seven first quadrant points and are listed in Table 4.

Figure 3 shows the normal tangential stress diagrams around the hole. Number 1 indicates the stresses diagram in layer 1, and number 2 - those in layer 2.

From the graphs obtained, the maximum difference between the stresses in the layers can be seen. For points on the horizontal axis, this difference is 2.955 or 3, and for points on the vertical axis, it is 0.143. This is related to the larger values of the modulus of linear deformation in the second layer compared to the first layer. The ratio of the Young’s modulus of the layers in the plane of isotropy is 5.06, and in the direction perpendicular to it, it is 2.54.

Table 4. Normal tangential stresses in layers

n	$\theta [^\circ]$	$\sigma_{\theta}^{(1)} / Q$	$\sigma_{\theta}^{(2)} / Q$
1	0	0.0452	0.1881
2	15	-0.0205	-0.0854
3	30	-0.1999	-0.8324
4	45	-0.4450	-1.8528
5	60	-0.6901	-2.8733
6	75	-0.8695	-3.6202
7	90	-0.9352	-3.8937

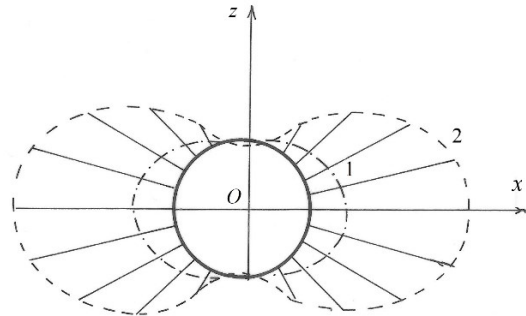


Fig. 3. Diagrams of normal tangential stresses for layers 1 and 2

**4. Key findings**

The approach described in the work is applied to rock mass with randomly located planes of isotropy relative to the boundary plane. The method is easy to apply and requires the use of popular computing tools such as spreadsheets (Harvey, 2018).

The analytical expressions for the stresses in each layer (6) are applied when the ratio of Young’s moduli in the layers is less than or equal to 2. For a ratio greater than 2, it is recommended to use the finite element numerical method (Podgórski, 2018). The task is spatial and a tetrahedral element is used.

This method is recommended to be used by engineers in pre-project design.

**Conclusion**

The research carried out can be extended in the following directions:

1. The method for determining the stresses in an array consisting of two layers can be generalised for more layers
2. The solution for the described class of problems can be applied to layers with time-varying deformations.
3. This method can be applied to a tunnel with a square, rectangular, and non-circular cross-section passing through two layers. The analytical expressions for the stresses in each layer are expressed by the known expressions for the stresses at points in the vicinity of the tunnel with different cross-sections (Kargar et al., 2014; Lu et al., 2014; Zhao et al., 2015).

**References**

Harvey, G. (2018). *Microsoft Excel 2019 for Dummies*. Alex Soft, 496p.



- Kargar, A. R., Rahmamejad. R., Hajabasi, M. A. (2014). A semi analytical elastic solution for stress field of lined non circular tunnels at depth using complex variable method. *Int. J. Solids. Struct.*, vol. 51, 1475-1482.
- Kuleniya, M. V., Popov, S. N. (1983). *Teoreticheskie osnovi opredeleniya v naprejenii v gornih porodah*. Izdatelstvo “Nauka”, Novosibirsk, 93p.
- Lu, A., Wang, H., Zhang L. (2024). *Complex variable solution in the Mechanical Analysis of Tunnels*. Springer, 400p. ISBN-10 981971690X.
- Lu, A. Z., Zhang, N., Kuang, L. (2014.) Analytical solution of stress and displacement for a non-circular tunnel at great depth, including Support delay. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 70;69-81.
- Martino, B., Ribacchi. R. (1972). Osservazioni su alcuni metodi di misura delle caratteristiche di racceo ammassi rocciosi con particolare riferimento al problema dell'anisotropia. *L'Industria Mineraria Serie II*, Anno XXIII, 5:193-203.
- Muskhelishvili, N. I. (1953). *Some basic problems of the mathematical Theory of Elasticity*. - Gromingen: Nordhoff, 706 p.
- Podgórski, J. (2018). Finite element method. 182p. [http://akropolis.pol.lublin.pl/users/jpkmb/Finite\\_Element\\_Method.pdf](http://akropolis.pol.lublin.pl/users/jpkmb/Finite_Element_Method.pdf)
- Tonnon, F., Amadei, B. (2003). Stresses in anisotropic rock masses: an engineering perspective building on geological knowledge. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* vol. 40.1099-1200.
- Trifonova-Genova, V., Tonkova. G. (2023). Stress around circular opening passing through two isotropic layers. *Annual of the University of Mining and geology “St. Iv, Rilski” - Sofia*, Vol. 66, Section II: Mining and Mineral Processing, 74-77.
- Zhao, C., Yang, S. (2015). Analytical solution for rock stress around square tunnels using complex variable theory, *Int. J. Rock Mech. Min Sci.*, Vol. 80., 302-307.

## DEVELOPMENT OF A BENEFICIATION TECHNOLOGY FOR MIXED ORE FROM PORPHYRY-COPPER DEPOSITS

*Teodora Yankova*

*University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: teodora.qnkova@mgu.bg*

**ABSTRACT.** This article focuses on the results obtained from laboratory technological studies carried out for the beneficiation of mixed (sulphide-oxide) ores from a porphyry-copper deposit. A selective-bulk flotation flowsheet is developed and presented for the sulphide-oxide copper ores from the porphyry-copper deposit. The technological study results show that the utilisation of useful components is possible and copper and pyrite concentrate production is effective. Finally, conclusions and summaries are presented.

**Key words:** beneficiation, sulphide-oxide ores, porphyry-copper deposits.

### РАЗРАБОТВАНЕ НА ТЕХНОЛОГИЯ ЗА ОБОГАТЯВАНЕ НА СМЕСЕНА РУДА ОТ МЕДНОПОРФИРНО НАХОДИЩЕ

*Теодора Янкова,*

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

**РЕЗЮМЕ.** Настоящата разработка представя резултатите от проведените технологични изследвания за обогатимост на смесена (сулфидно-оксидна) руда от меднопорфирно находище. Разработена и представена е колективно-селективна схема на флотация на смесените сулфидно-оксидни руди от меднопорфирното находище, която позволява комплексното оползотворяване на полезните компоненти, получавайки меден и пиритен концентрати.

**Ключови думи:** обогатяване, сулфидно-оксидни руди, меднопорфирни находища.

### Въведение

Над 60% от световното производство на мед е от руди, добити от меднопорфирни находища. Наред с медта в тези находища са налични и множество други ценни метали, като: злато, сребро, молибден, платина, паладий, селен, телур, бисмут, кобалт, никел (Токмачиева, 2002). Много от тях могат да се появят в едно и също находище в различни пропорции и на различни дълбочини. Този факт силно затруднява тяхното проучване и изследване. Медта е стратегическа суровина от първостепенно значение за зеления и цифров преход и в бъдеще търсенето на мед ще продължи да нараства и да се запълва, чрез откриване на нови находища, поради което много полезни на този етап от изследванията са геофизичните методи (Томова, 2023).

Както споменава Григорова (2020), разнородният характер на скалните разновидности усложнява минно-добивния процес, като създава трудности основно при раздробяването на рудната маса. За изучаване на характеристиките на находището и детайлното картиране на скалните разновидности е подходящо и сравнително лесно приложимо да се използват геофизични методики, базиращи се на разликата във физичните свойства на рудните минерали с различен състав и вместиците ги скали. Ниското съдържание на метали в меднопорфирните находища се компенсира от големите им размери, както и от наличието на други ценни съпътстващи компоненти и извършвания по открит способ добив. Според Tabelin и колектив (2021) меднопорфирните руди и електронните отпадъци са двата най-важни ресурса на мед на планетата (Tabelin et al., 2021).

В настоящата разработка се привеждат резултати от извършените технологични изследвания за обогатяване на сулфидно-оксидна медна руда от меднопорфирно находище. Подготовката на представителна проба и

изследванията за разработване на технология за обогатяване са извършени в лабораториите на катедра „Обогатяване и рециклиране на суровини“, Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“.

Представената за изследване на обогатимост технологична проба характеризира смесена сулфидно-оксидна руда от прожилково впръснат тип. Основен ценен компонент в рудата е медта със съдържание 0.554 %. Като съпътстващ компонент с промишлено значение е пиритната сяра – 1.27 %. Молибденът поради ниското му съдържание – 0.0029 % на този етап не представлява промишлен интерес. Медта е представена от халкопирит (55.40 % от общата мед) вторични медни минерали – халкоцит и ковелин (23.74 % от общата мед) и малахит – 19.78 % от медта (Янкова, 2023).

Резултатите от проведените изследвания за смисленост на рудната проба и определеният енергиен индекс на Бонд показват, че смесената сулфидно-оксидна руда е лесно смислаема (Янкова, Григорова, 2023).

### Методи и материали

Проведените технологични флотационни изследвания по обогатимост доказват, че с колективно-селективна схема на флотация за обогатяване на сулфидно-оксидните руди от меднопорфирното находище се постигат високи технологични показатели за този тип руди (Yankova, Dimitrov, Grigorova, 2023).

Колективно-селективната схема на обогатяване включва следните операции: смилане на рудата до 65% класа „- 0.080 mm“; основна колективна флотация; пречистна флотация; контролна пречистна флотация; досмилане на колективния Cu-Py концентрат до 85% класа „- 0.080 mm“; основна и контролна медна флотация; две последователни пречистни флотации за получаване на меден концентрат; съгъстяване на отпадъка от медна

флотация до 40% тв.; агитация; разреждане до 20% тв.; основна и контролна пиритна флотация; две последователни пречистни флотации за получаване на пиритен концентрат. В таблица 1 са представени данни от химичния анализ на представителната рудна проба.

Таблица 1. Химичен състав на рудата от техноложката проба (Янкова, 2023)

Компоненти	Съдържание (%)
Cu	0.554
S	1.27
Mo	0.0029
Zn	0.0051
Pb	0.0005
As	0.0003
Sb	<0.0005
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.80
SiO <sub>2</sub>	75.75
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11.78
CaO	0.89
MgO	0.95
Na <sub>2</sub> O	2.35
K <sub>2</sub> O	3.55
C	0.02
Ag	<1 g/t
Au	<0.05 g/t
ЗПН	3.16

Основният ценен компонент в рудата е медта – 0.554%. Рудната проба се характеризира с относително

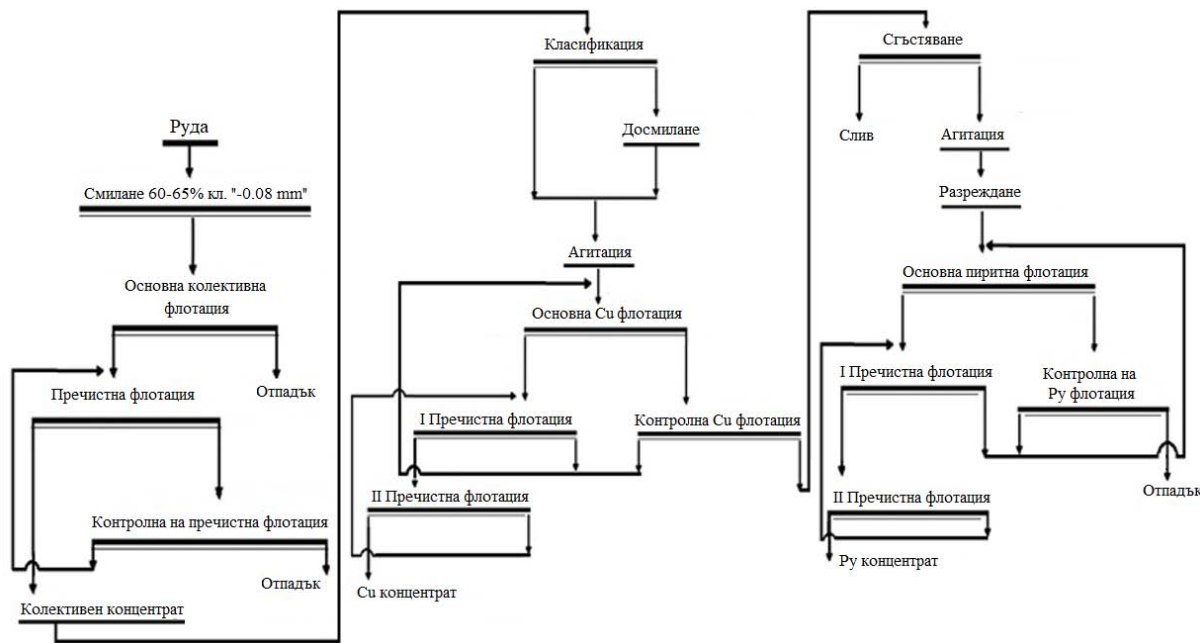
високо съдържание на мед. Като съпътстващ компонент с промишлено значение е установена пиритна сяра – 1.27%. Съдържанията на молибден и злато в рудата са много ниски, съответно Mo – 0.0029% и Au - под 0.05 g/t. Фазовият анализ на медта показва следното разпределение на медните минерали: 19.78% от медта е под формата на т.н. окисна свободна мед; медта под формата на вторични сулфиди възлиза на 23.74%; 55.40% от медта е представена от първични медни сулфиди.

Първичната сулфидна мед е представена от халкопирит. Вторичната сулфидната мед е представена основно от халкоцит и ковелин и в незначително количество борнит. Оксидната свободна мед е представена основно от малахит (Янкова, 2023).

### Резултати и дискусия

Проведени са технологични изследвания с цел разработване на технология за извличане на мед и пирит в самостоятелни концентрати от смесени сулфидно-оксидни руди от меднопорфирно находище.

Въз основа на получените резултати от изследванията по обогатимост е разработена технология за получаване на меден концентрат и пиритен концентрат от смесени сулфидно-оксидни медни руди. На фигура 1 е представена схема за обогатяване на сулфидно-оксидните руди от меднопорфирното находище.



Фиг. 1. Схема за обогатяване на сулфидно-оксидни руди от меднопорфирно находище

Таблица 2 представя технологичните показатели на колективно-селективната схема за обогатяване на смесените сулфидно-оксидни руди.

В таблица 3 са представени данни от химичния анализ на получения меден концентрат, а таблица 4 показва данни от проведения зърнометричен анализ, с разпределение на полезните компоненти по класи на медния концентрат.

Таблица 2. Технологични показатели за обогатяване на сулфидно – оксидни руди

Продукти	Добив, %	Съдържание, %		Извличане, %	
		Мед	Сяра	Мед	Сяра
Меден концентрат	1.81	24.64	28.20	80.21	40.19
Пиритен концентрат	1.32	0.27	45.26	0.64	47.10
Отпадък	96.87	0.11	0.167	19.15	12.71
Руда	100	0.556	1.27	100	100

Таблица 3. Химичен състав на меден концентрат от обогатяването на смесена сулфидно-оксидна руда

Продукт	Cu, %	Mo, g/t	Au, g/t	S, %
Меден концентрат	24.65	844	0.54	28.30
Продукт	C, %	Na <sub>2</sub> O, %	MgO, %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %
Меден концентрат	0.21	0.65	0.45	6.52
Продукт	SiO <sub>2</sub> , %	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , %	K <sub>2</sub> O, %	CaO, %
Меден концентрат	10.65	0.39	1.40	0.72
Продукт	TiO <sub>2</sub> , %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	ЗПН, %	
Меден концентрат	0.18	34.48	1.82	

Таблица 4. Ситов анализ с разпределение на полезните компоненти по класи на меден концентрат от обогатяването на смесена сулфидно-оксидна руда

Класи, mm	Добив, %		Съдържание, %		Разпределение, %	
	Частен	Сумарен	Мед	Сяра	Мед	Сяра
+0.10	7.20	7.20	10.96	28.70	3.18	7.31
-0.10 + 0.080	12.35	19.55	18.71	28.06	9.31	12.22
-0.08 + 0.063	20.25	39.80	16.62	28.06	13.56	20.04
-0.063 + 0.040	23.40	63.20	27.53	28.26	25.96	23.32
-0.040 + 0.025	12.20	75.40	32.18	29.47	15.82	12.68
-0.025 + 0.010	15.90	91.30	33.45	30.77	21.43	17.25
-0.010	8.70	100.00	30.64	23.40	10.74	7.18
Сума	100.00	-	24.82	28.36	100.00	100.00

В таблица 5 са представени данни от химичния анализ на получения пиритен концентрат, а в таблица 6 са представени данни от проведения зърнометричен анализ, с разпределение на полезните компоненти по класи на пиритния концентрат.

Таблица 5. Химичен състав на пиритен концентрат от обогатяването на смесена сулфидно-оксидна руда

Продукт	Cu, %	Mo, g/t	Au, g/t	S, %
Пиритен концентрат	0.27	86	-	45.20
Продукт	C, %	Na <sub>2</sub> O, %	MgO, %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %
Пиритен концентрат	-	0.68	0.25	6.47
Продукт	SiO <sub>2</sub> , %	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , %	K <sub>2</sub> O, %	CaO, %
Пиритен концентрат	6.83	0.25	0.72	0.86
Продукт	TiO <sub>2</sub> , %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	ЗПН, %	
Пиритен концентрат	0.65	55.36	-	

Таблица 6. Ситов анализ и разпределение на полезните компоненти по класи на пиритен концентрат от обогатяването на смесена сулфидно-оксидна руда

Класи, mm	Добив, %		Съдържание, %		Разпределение, %	
	Частен	Сумарен	Мед	Сяра	Мед	Сяра
+0.125	1.26	1.26	-	-	-	-
-0.125 + 0.080	19.72	20.93	0.270	36.94	21.59	17.12
-0.080 + 0.063	9.97	30.96	0.231	46.06	8.79	10.17
-0.063 + 0.040	33.51	64.46	0.212	47.57	27.09	35.30
-0.040 + 0.025	18.49	82.95	0.212	48.53	14.95	19.87
-0.025	17.05	100.00	0.424	46.46	27.58	17.54
Сума	100.00	-	0.262	45.16	100.00	100.00

## Заклучение

Разработената колективно-селективна схема на флотация на смесените сулфидно-оксидни руди от меднопорфирно находище позволява комплексното оползотворяване на полезните компоненти, с получаването на меден и пиритен концентрати. Проведените технологични флотационни изследвания доказват, че с тази схема на обогатяване на смесени сулфидно-оксидни руди се постигат високи технологични показатели за този тип руди. По разработената колективно-селективна схема на флотация, включваща схема в открит цикъл на колективна флотация, медно-пиритна селекция и пиритна флотация са получени следните крайни продукти и технологични показатели: меден концентрат със съдържание на мед 24.64 % и сяра 28.20 %, при извличане на медта 80.21 % и на сярата 40.19 %; пиритен концентрат със съдържание на сяра 45.26 % и извличане от общата сяра 47.10 %.

## Литература

- Григорова, М. (2020). Геофизични методи при решаване на инженерно-геоложки задачи свързани с повишаване ефективността в условията на открит рудник „Хан Крум“, *Геология и минерални ресурси*, 6-7, 3-9.
- Токмачиева, М. (2002). Ценни съпътстващи компоненти в състава на българските медно-порфирни находища, *Годишник на МГУ, том 45, свитък I, Геология*, София, 69-74.
- Янкова, Т. (2023). Веществен състав на смесен тип сулфидно-оксидни руди от меднопорфирно находище, *Годишник на МГУ, том 66, София*, ISSN 2738-8808 (print), ISSN 2738-8816 (online), (83-86). <https://zenodo.org/records/8334150>
- Янкова, Т., Григорова, И. (2023). Физико-механични свойства на смесен тип сулфидно-оксидна руда от меднопорфирно находище, *Годишник на МГУ, том 66, София*, ISSN 2738-8808 (print), ISSN 2738-8816 (online), (87-90). <https://zenodo.org/records/8334162>.
- Tabelin, C. B., Park, I., Phengsaart T., Jeon, S., Villacorte-Tabelin, M., Alonzo, D., Yoo, K., Ito, M. & Hiroyoshi, N. (2021). Copper and critical metals production from porphyry ores and E-wastes: A review of resource availability, processing/recycling challenges, socio-environmental aspects, and sustainability issues, *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 170, Article e 105610. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105610>.
- Tomova, M. (2023). Possibilities of geophysical methods for monitoring an integrated mine waste facility, *Annual of the UMG, vol. 66, Sofia, Bulgaria* (180-185). <https://zenodo.org/records/8334672>.
- Yankova, T., Dimitrov, L., Grigorova, I. (2023). Beneficiation of sulfide-oxide ore from a porphyry – copper deposit – technological investigations, *Proceedings of XIX Balkan Mineral Processing Congress, May 28-31, 2023, Prishtine, Kosovo 2023*, pp. 265-270, ISBN 978-9951-9138-0-5.





**СЕКЦИЯ**

**ДОБИВ НА ЕНЕРГИЙНИ РЕСУРСИ**

**SECTION**

**EXTRACTION OF ENERGY RESOURCES**



# INFLUENCE OF HYDROGEN CONTENT IN GAS MIXTURES WHEN DETERMINING THE COMPRESSIBILITY FACTOR

**Olga Vlaykova, Martin Boyadzhiev, Lachezar Georgiev**

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: o.vlaykova@mgu.bg; martinb@mgu.bg; lachezar.georgiev@mgu.bg

**ABSTRACT.** The report presents a methodology for determining the compressibility factor at different hydrogen contents in gas mixtures. Based on the presented methodology, the change of the compressibility coefficient of gas pipeline mixtures, with different hydrogen content, under different thermobaric conditions and the characteristics of gas distribution networks, is determined. Attention is paid to the influence of the exact determination of the compressibility factor when considering the consumption of gas hydrogen mixtures by consumers, as well as to the hydraulic dimensioning of the gas distribution networks, through which the gas-hydrogen mixture will be transported.

**Key words:** hydrogen, gas mixtures, compressibility factor.

## ВЛИЯНИЕ НА СЪДЪРЖАНИЕТО НА ВОДОРОД В ГАЗОВИ СМЕСИ ПРИ ОПРЕДЕЛЯНЕ НА КОЕФИЦИЕНТА НА СВРЪХ СВИВАЕМОСТ

**Олга Влайкова, Мартин Бояджиев, Лъчезар Георгиев**  
Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София

**РЕЗЮМЕ.** В доклада е представена методика за определяне на коефициента на свръх свиваемост при различно съдържание на водород в газова смес. На база на представената методика е определено изменението на коефициента на свръх свиваемост на газопроводни смеси с различно съдържание на водород и при различни термобарични условия, характерни за газоразпределителните мрежи. Обърнато е внимание на влиянието на точното определяне на коефициента на свръх свиваемост при отчитане потреблението на газоводородните смеси от потребителите, както и за хидравличното оразмеряване на газоразпределителните мрежи по които ще се транспортира газо-водородна смес.

**Ключови думи:** водород, газова смес, коефициент на свръх свиваемост.

## Introduction

Natural gas is a mixture of hydrocarbons of light components from methane to propane (Nikolov, 2007; Boyadzhiev, 2023). With the advent of decarbonisation and low carbon footprint requirements, the deployment of hydrogen in natural gas distribution and delivery systems is increasingly coming. (“A European Green Deal,” n.d.) The requirements are for an energy transition to climate neutrality by 2050. The ambitious goal set by 2030 is to reduce CO<sub>2</sub> emissions in the EU by 55% (Metalova, n.d.). This will reflect that in future, similar requirements will also be set in the Bulgarian legislation as part of the European legislation and as a party to the GREEN DEAL.

The world is changing and more countries are taking action to implement hydrogen in their energy sector. The share of renewable energy sources (RES) occupies an increasing percentage of the total energy distribution (Alhorr et al., 2014; Mitkov et al., 2022). The development of new technologies and facilities becomes a key factor for the development of enterprises in the new era. Production is becoming more and more financially intensive and innovative (Basu et al., 2023).

Successful implementation of technologies for the production of electricity and heat from solar, wind, and water sources is one of the factors of development (Georgiev and Lakov, 2011; Karadjov, 2021), with the trends of replacing natural gas with hydrogen fuel increasingly being imposed.

The use of hydrogen is increasingly being introduced by the European institutions and short deadlines oblige companies to apply programs for the implementation of RES, hydrogen, and other technologies that reduce the release of carbon dioxide into the atmosphere. Hydrogen is introduced into the natural gas supply networks, being generated by electrolysis using green

energy (photovoltaic, wind generators, etc.) and/or injected in different concentrations into the gas supply network, in different concentrations within the proven possibility for operation without change in the system and users' devices - between 5 and 20% depending on the system in which it is injected (*Complementing the repower EU action plan: investment needs, hydrogen accelerator and achieving the bio-methane targets*, 2022).

Gas supply networks in combination with hydrogen generated by RES are already being considered for use by Bulgarian energy companies or households, and such a practice is gaining popularity (Karadjov, Hristova (2023), “How pink hydrogen could add to the nuclear renaissance,” n.d.).

There are tendencies to increase the share of research to achieve improvement of the energy efficiency of gas supply networks by using hydrogen generated by RES and its application in the existing constructed network infrastructure (Gondal et al., 2018; *The European Green Deal*, 2019).

The requirement of the European Union for the use of hydrogen in gas supply networks sets tasks related to the accounting of the passed energy, and this is directly related to the digital tracking of the flows of mixtures of hydrogen and natural gas (Directive 2009/73/EC of the European Parliament and of the Council of 13 July 2009 concerning common rules for the internal market in natural gas and repealing Directive 2003/55/EC,” 2009; Hristov P, Hristova T, 2019).

More and more European programs are being implemented, such as hydrogen deployment projects, and scientific research on the safety and reliability of cogeneration technology is carried out (“European Hydrogen Safety Panel,” n.d.). That is why the share of hydrogen use in gas supply networks in many European countries through the construction of mixed hydrogen-gas supply systems is steadily increasing.

The purpose of the study is to present the variation of the compressibility factor deviation from an ideal gas  $z$  factor, at different input data of the systems. The parameters: pressure, hydrogen concentration and temperature are important when consider the consumption of gas-hydrogen mixtures by consumers, as well as for the hydraulic dimensioning of the distribution networks. The test for compressibility factor is done according to the Standing-Katz method. The research done gives a clear idea of the changes of the compressibility parameter, as an important factor for the correct accounting of the change in the behavior of the gases from the ideal case and their accounting, as a flow in the networks.

### Specifics of the compressibility coefficient for hydrogen in gas mixtures

The injection of hydrogen into networks is technically carried out by creating "mixed systems". They aim to improve or replace existing gas supply systems with ones using a mixture of hydrogen and natural gas. Therefore, hydrogen can feed the existing gas supply networks, in different concentrations, so that a substantial reconstruction of the networks leading to significant resources is not required.

The state of gases is defined primarily by the volume, temperature, and pressure of the system. Accounting for the deviation from the state of ideal gases from real gases requires the determination of the dimensionless value of the coefficient of compressibility  $Z$ , under different thermobaric conditions.

Here, the following equation is in force:

$$PV = z \cdot n \cdot R \cdot T, \quad (1)$$

where:

- P is the pressure in Pa;
- T – temperature in °C;
- R – universal gas constant in J/kmol.K;
- V – volume in m<sup>3</sup>;
- Z - compressibility factor;
- n – number of mols in kmol.

According to the Standing–Katz diagrams, the reduced and critical values of the thermobaric conditions under which the gas is present play a role in determining the  $z$  factor.

$$P_{pr} = \frac{P}{P_{cr}}; \quad (2)$$

$$T_{pr} = \frac{T}{T_{cr}}; \quad (3)$$

where  $P_{cr}$  and  $T_{cr}$  are pseudocritical pressure and temperature, in MPa and K, respectively, and  $P$  and  $T$  are the pressure and the temperature in MPa and K.

$$T_{cr} = \sum_{k=0}^n y_i \cdot T_{cri}; \quad (4)$$

$$P_{cr} = \sum_{k=0}^n y_i \cdot P_{cri}; \quad (5)$$

For a real estimate of the coefficient of overcompressibility, the Standing-Katz plots give a certain accuracy of about 5% under certain conditions of the gas mixture as follows:  $P < 12$  MPa,  $T < 70$  °C,  $H_2S$  and  $CO_2 < 5\%$  mol, content of  $N_2$  up to 10% mol (Nikolov, 2007).

To calculate the coefficient of deviation from ideal gases, an approximation of the graphs can be used the Latonov-Gurevich dependence (Nikolov, 2007), according to the formula:

$$z = [0,4 \lg T_{pr} + 0,73]^{P_{pr}} + 0,1 P_{pr} \quad (6)$$

where:

- $z$  is the compressibility factor;
- $T_{pr}$  – brought down temperature in K;
- $P_{pr}$  – brought down pressure in MPa.

The composition of the gas is essential in determining the reduced and critical temperatures, and pressures. Therefore, calculations were made at different composition ratios in terms of the percentage of hydrogen to methane, varying from 0 to 100%.

The analysis of the variation of the compressibility coefficient, in relation to the different hydrogen content, aims to show indirectly what would be the variation of the volume in relation to the composition of the gas under the different thermobaric conditions. The goal is to investigate and predict the possible changes that occur when the content of methane in the mixture is changed, as well as to perform the necessary recalculations with a view to the accurate digital measurement of the flows in the networks and their main parameters. ("European Hydrogen Safety Panel," n.d.).

The main problem here is the properties of hydrogen and its specifics. Safety makes serious demands to achieve this goal. From the resulting new hydrogen injection mixtures, the strengths of the implementation of hydrogen in gas supply and gas transport networks can be shown, but the weaknesses of the system can also be seen, which at the same time are the dangers that could arise. The reason is that hydrogen injection is related to a number of factors changing the working conditions of urban distribution networks where a low risk to the population is sought. To achieve this, it is necessary to analyse the gas-dynamic changes resulting from changes in the system parameters, such as temperature, flow, and pressure, as well as fluid composition, due to an increase in the concentration of hydrogen in the network.

### Methodology for determining the coefficient of compressibility of gas-hydrogen mixtures

Calculation of compressibility coefficients and gas law deviation coefficients is performed using a modified Equation SGERG-mod-H2 (Report PK 1-5-3 Dr. Peter Schley, 2021).

When choosing a option in relation to the main operating conditions, technical parameters of the gas distribution systems and networks in Bulgaria, as subdivided in the Ordinance on the device and safe operation of transmission and distribution gas pipelines and natural gas facilities, installations and appliances, were selected according to the pressure; (PMSN№171/16.07.2004, n.d.). That is why high, medium and low pressure was considered, and taken as characteristics of the pipelines.

Another parameter is the temperature. Natural gas in the country is traded under standard conditions, which means at  $T = 20$ °C and  $P_{atm} = 101\,325$  Pa, while in Europe standard conditions are set at  $T = 15$ °C.

For the compressibility coefficient, another important parameter is the critical pressure and temperature  $P_{cr}$  (Pa) and  $T_{cr}$  (K), according to formulae 4 and 5.

The SGERG-88 equation was developed by Jaeschke et al. described in the international standard ISO 12213-3 "pipeline quality gas". For the application of hydrogen in the systems, it is necessary to ensure against the corrosive effects on the material, as with the increase in the mole fraction of hydrogen, the replacement of the material of the pipelines and the equipment to them is also required. In view of the safety of applying higher concentrations of hydrogen in the systems and providing protection against corrosion activity, the following measures are recommended, with up to 17% not requiring replacement of the types of pipes used according to the authors (Clegg and Mancarella, 2016):

The limit for the hydrogen content was set at 20 mol %, as an acceptable content for safety reasons from the point of view of the immutability of the pipe material. The density is in the range of  $0.55 \leq d \leq 0.80$ ; the density range under standard conditions is from  $0.711 \text{ kg/m}^3 \leq \rho \leq 1.034 \text{ kg/m}^3$ . (Technical report PK 1-5-3 Dr. Peter Schley, 2021). Therefore, the calculations performed are based on hydrogen percentage, pressure, and temperature.

The flowchart of the methodology for determining the coefficient of compressibility factor of gas-hydrogen mixtures is shown in Figure 1.

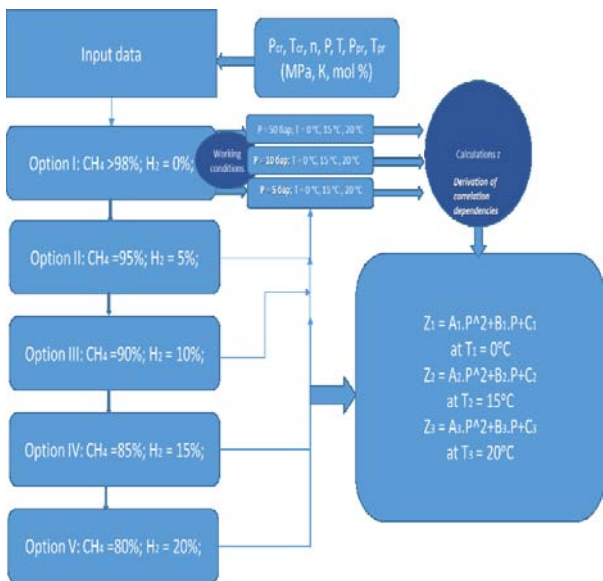


Fig. 1. Flowchart for calculating the coefficient of the compressibility factor

**Results**

The results obtained from the calculations at pressures of 50, 10, and 5 bar for the five options at different temperatures 20 °C, 15 °C, and 0 °C and content in the gas of H<sub>2</sub>=0%, H<sub>2</sub>=5%, H<sub>2</sub>=10%, H<sub>2</sub>=15%, and H<sub>2</sub>=20%, are given in Table 1 below. In view of the fact that gas distribution and supply networks of high density polyethylene exhibits activity in relation to the concentration of hydrogen in the H<sub>2</sub>G mix, there is no major corrosion hazard within up to 20% presence of hydrogen in the system. Rather, in networks, the risk is of diffusion, migration,

and leakage of gas into the atmosphere (Gondal, 2019; Gondal et al., 2018).

Table 1. Change in the coefficient of compressibility

Option	CH4 %	H2 %	P bar	T=20°C Z	T=15°C Z	T=0°C Z
I	~100	~0	50	0,9117	0,9055	0,8835
			10	0,9817	0,9806	0,9765
			5	0,9909	0,9903	0,9880
II	~95	~5	50	0,9228	0,9172	0,8976
			10	0,9838	0,9827	0,9790
			5	0,9919	0,9913	0,9895
III	~90	~10	50	0,9332	0,9282	0,9108
			10	0,9858	0,9848	0,9814
			5	0,9929	0,9924	0,9907
IV	~85	~15	50	0,94295	0,9385	0,9231
			10	0,9877	0,9868	0,9838
			5	0,9938	0,9934	0,9918
V	~80	~20	50	0,95205	0,9481	0,9345
			10	0,9895	0,9887	0,9860
			5	0,9947	0,9943	0,9929

Figure 2 shows the variation of the coefficient of compressibility factor for option I, at pressure from 5 to 50 bar and temperature from 0 °C to 20 °C. Correlation dependences have been derived for express stepwise determination of the coefficient of compressibility factor in the analysed thermobaric range, with content of 100% of methane in the gas.

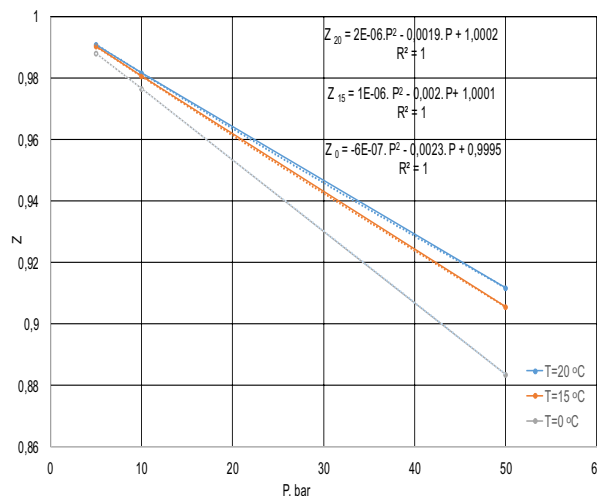


Fig. 2. Variation of the coefficient of compressibility for option I

Figure 3 shows the variation of the coefficient of compressibility factor z for option II, at pressure from 5 to 50 bar and temperature from 0 °C to 20 °C. Correlation dependences have been derived for express stepwise determination of the compressibility coefficient in the analysed thermobaric range, with a content of 95% of methane and 5% of hydrogen in the gas mixture.



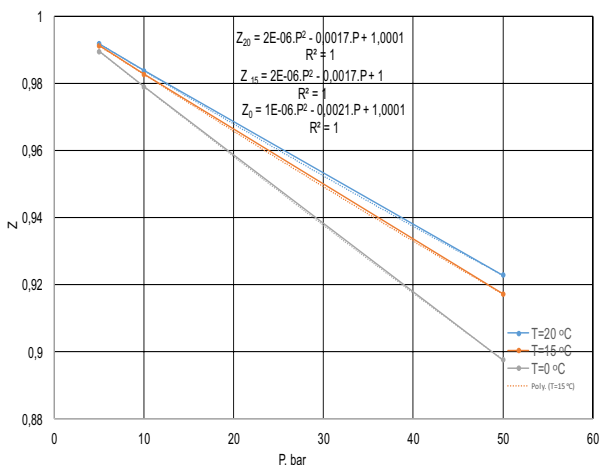


Fig. 3. Variation of the coefficient of compressibility for option II

Figure 4 shows the variation of the coefficient of compressibility factor for option III, at pressure from 5 to 50 bar and temperature from 0 °C to 20 °C. Correlation dependences have been derived for express stepwise determination of the coefficient of compressibility factor z in the analysed thermobaric range when the gas mixture contains 90% of methane and 10% of hydrogen.

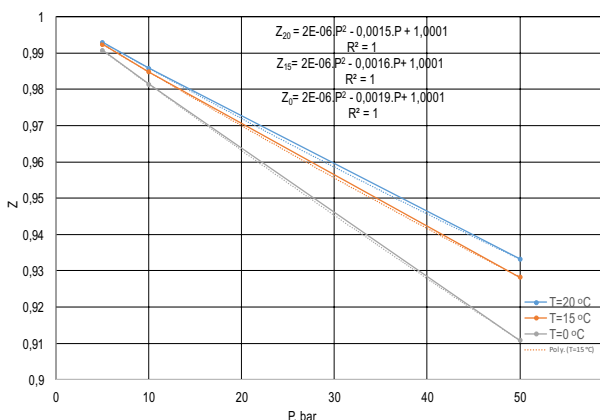


Fig. 4. Variation of the compressibility factor for option III

Figure 5 shows the variation of the coefficient of compressibility factor for option IV at pressure from 5 to 50 bar and temperature from 0 °C to 20 °C. Correlation dependences have been derived to express stepwise determination of the compressibility coefficient in the analysed thermobaric range with a content of 85% of methane and 15% of hydrogen in the gas mixture.

Figure 6 shows the variation of the coefficient of compressibility for option V at pressure from 5 to 50 bar and temperature from 0 °C to 20 °C. Correlation dependences have been derived for express stepwise determination of the compressibility coefficient in the analysed thermobaric range with a content of 80% of methane and 20% of hydrogen in the gas mixture.

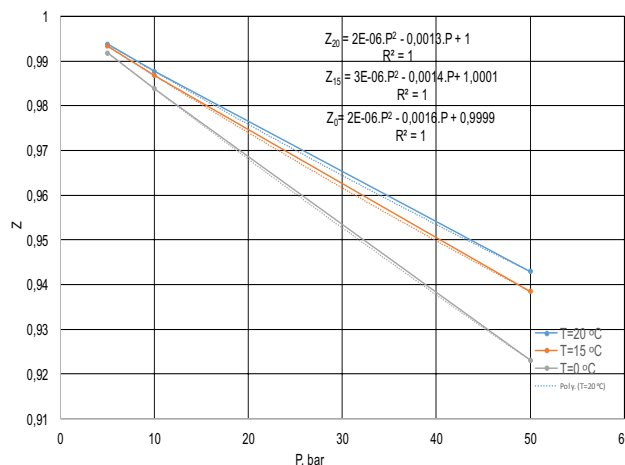


Fig. 5. Variation of the coefficient of compressibility factor for option IV

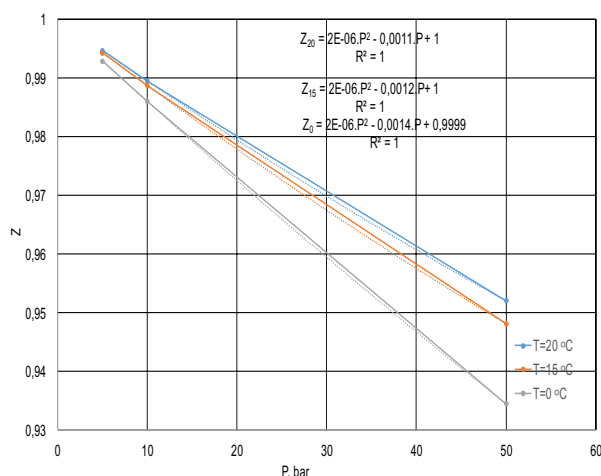


Fig. 6. Variation of the coefficient of compressibility factor for option V

## Conclusions

From the calculations made according to the presented methodology, it was established that the coefficient of the compressibility factor for a gas-hydrogen mixture in the analysed thermobaric range and with a hydrogen content of 5 to 15% hydrogen in the gas-hydrogen mixture changes significantly.

In the developed methodology, the use of the GERG-2008 equation for calculating the coefficient of compressibility for a gas-hydrogen mixture, has deviations smaller than  $\pm 0.1\%$ ; and are usually less than  $\pm 0.05\%$ .

The derived correlation dependences to express step-by-step determination of the coefficient of the compressibility factor in the analysed thermobaric range at a hydrogen content of 5 to 15% in a gas-hydrogen mixture are applicable when considering the consumption of gas-hydrogen mixtures by consumers, as well as for the hydraulic dimensioning of gas distribution networks.

## References

- Alhorr, Y., Eliskandarani, E., Elsarrag, E., (2014). Approaches to reducing carbon dioxide emissions in the built environment: Low carbon cities. *International Journal of Sustainable Built Environment* 3, 167–178.
- Basu, P., Deb, P., Singh, A., (2023). Blockchain and the carbon credit ecosystem: sustainable management of the supply chain. *Journal of Business Strategy ahead-of-print*. <https://doi.org/10.1108/JBS-09-2022-0157>
- Boyadjiev, M., (2023). *Neural networks in the gas industry*. Print Factor Ltd., Sofia. ISBN 978-619-7427-24-0
- Clegg, S., Mancarella, P., (2016). Storing renewables in the gas network: modelling of power-to-gas seasonal storage flexibility in low-carbon power systems. *IET Generation, Transmission & Distribution* 10, 566–575. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2015.0439>
- Ejdys, J., Szpilko, D. (2022). European Green Deal — research directions. A systematic literature review. *EiS* 81, 8–38. <https://doi.org/10.34659/eis.2022.81.2.455>
- Ekhtiari, A., Flynn, D., Syron, E. (2022). Green Hydrogen Blends with Natural Gas and Its Impact on the Gas Network. *Hydrogen* 3, 402–417. <https://doi.org/10.3390/hydrogen3040025>
- Gondal, I.A., (2019). Hydrogen integration in power-to-gas networks. *International Journal of Hydrogen Energy* 44, 1803–1815. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.11.164>
- Gondal, I.A., Masood, S.A., Khan, R., (2018). Green hydrogen production potential for developing a hydrogen economy in Pakistan. *International Journal of Hydrogen Energy* 43, 6011–6039. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.01.113>
- Hristov, P., Hristova P. (2019). Explaining the DLT Applications in the Context of a Customers, Facility Managements and Utility Companies Relationship, *16-th International Conference On Electrical Machines, Drives And Power Systems (ELMA)*, IEEE, 2019
- Hristova, T. (2017). Measures for restricting corrosion of a motor drive subjected to atmospheric corrosion in the plant for wastewater treatment. *Quality-Access to Success* 18(S1), 202–207.
- Jaeschke, M., Hinze, H. M. and Humphreys, A., *Supplement to the GERG Databank of High-Accuracy Compression Factor Measurements*, Düsseldorf, GERG Technical Monograph TM7.
- Karadjov, M., (2021). Problems, opportunities and solutions for the gas supply of households in Bulgaria. *Min. and Geo. Sci.* 2, 33–36.
- Karadjov, M., (2022). Design, construction, maintenance and service of domestic hybrid systems using natural gas. *Mining and Geology* 9, 42–46
- Kunz, O. and W. Wagnern (2012). The GERG-2008 Wide-Range Equation of State for Natural Gases and Other Mixtures: An Expansion of GERG-2004, *J. Chem. Eng. Data*, vol. 57, pp. 3032-3091, 2012.
- Mitkov, V., Georgiev, L., Lakov, N. (2022). Production of electrical and thermal energy from natural gas. *Presented at the BULCAMK*, pp. 87–91.
- Nikolov, G., (2007). Transport and storage of oil and gas, *Annual of University of Mining and Geology*.
- Richter, M., Souissi, M. Ben, Span, R. and Schley, P. (2014). Accurate ( $p, \rho, T, x$ ) Measurements of Hydrogen-Enriched Natural-Gas Mixtures at  $T = (273.15, 283.15, \text{ and } 293.15) \text{ K}$  with Pressures up to 8 MPa, *J. Chem. Eng. Data*, vol. 29, pp. 2021-2029, 2014.
- I. 20765-2:2015, Natural gas — Calculation of thermodynamic properties — Part 2: Single-phase properties (gas, liquid, and dense fluid) for extended ranges of application, International Standard Organization, 2015.
- AGA Transmission Measurement Committee, Thermodynamic Properties of Natural Gas and Related Gases: DETAIL and GROSS Equations of State.
- AGA Report No. 8, Part I, 1st ed., Catalog No. XQ1704-1, 1992.
- AGA Transmission Measurement Committee, Thermodynamic Properties of Natural Gas and Related Gases: DETAIL and GROSS Equations of State.
- AGA Report No. 8, Part I, 2nd ed., Catalog No. XQ1704-1, 1994.
- AGA Transmission Measurement Committee, Thermodynamic Properties of Natural Gas and Related Gases: DETAIL and GROSS Equations of State.
- AGA Report No. 8, Part I, 3rd ed., Catalog No. XQ1704-1, 2017.
- Directive 2009/73/EC of the European Parliament and of the Council of 13 July 2009 concerning common rules for the internal market in natural gas and repealing Directive 2003/55/EC, 2009.
- DVGW G260, DVGW Arbeitsblatt G 260: Gasbeschaffenheit. Technische Regel, Bonn: DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V., 2020.
- DVGW G685, DVGW Arbeitsblatt G 685: Gasabrechnung (Teil 1-7). Technische Regel, Bonn: DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V., 2020.
- ISO 12213-3:2006-11, Natural gas - Calculation of compression factor, Part 3: Calculation using physical properties, International Standard Organization, 1997, second edition 2006-11-15.
- ISO 12213-2:2006-11, Natural gas - Calculation of compression factor - Part2: Calculation using molar-composition analysis, International Standard Organization, 1997, second edition 2006-11-15.
- PK 1-5-3 Dr. Peter Schley, SmartSim GmbH, B.Sc. Tan-Trieu-Giang Nguyen, Ruhr-Universität Bochum; Prof. Dr. Roland Span, Ruhr-Universität Bochum; Dr. Andreas Hielscher, SmartSim GmbH Gerhard Kleppek; GASCADE Gastransport GmbH, Dr. Jos van der Grinten, Physikalisch-Technische Bundesanstalt; Dr. Roland Schmidt, Physikalisch-Technische Bundesanstalt; Dr. Stefan M. Sarge, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, January 30th, 2021 (corrected on May 19th, 2022)
- PMS №171/16.07.2004, n.d. Ordinance on the construction and safe operation of transmission and distribution gas pipelines and natural gas facilities, installations and appliances Ordinance on the construction and safe operation of transmission and distribution gas pipelines and natural gas facilities, installations and appliances [WWW Document]. DV № 50/17.06.2014. <https://ekspertis.bg/document/view/law/118026/49958/> (accessed 4.21.23).

# ANALYSIS OF THE CURRENT REGULATIONS FOR DESIGNING, CONSTRUCTION, COMMISSIONING, AND MAINTENANCE OF BUILDING GAS INSTALLATIONS FOR NATURAL GAS AND PROPOSALS FOR THEIR UPDATING

**Mario Karadjov**

*University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: mario.karadjov@mgu.bg*

**ABSTRACT:** The article analyses the main standards in force in the field of natural gas supply to public, administrative, and household consumers and related activities for designing, construction, commissioning, and maintenance of building gas systems and proposals for update. The European practice in this sector has been studied. The necessary administrative approaches and changes in the current legislation are proposed for a clearer regulation of the described activities to ensure the reliability and safe operation of building gas installations.

**Key words:** natural gas, government regulations, standards, technical supervision, high-risk equipment

## АНАЛИЗ НА ДЕЙСТВАЩАТА НОРМАТИВНА УРЕДБА ЗА ПРОЕКТИРАНЕ, ИЗГРАЖДАНЕ, ВЪВЕЖДАНЕ В ЕКСПЛОАТАЦИЯ И ПОДДРЪЖКА НА СГРАДНИ ГАЗОВИ ИНСТАЛАЦИИ ЗА ПРИРОДЕН ГАЗ И ПРЕДЛОЖЕНИЯ ЗА ТЯХНАТА АКТУАЛИЗАЦИЯ

**Марио Караджов**

*Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София, E-mail: mario.karadjov@mgu.bg*

**РЕЗЮМЕ.** В статията са анализирани основните действащи норми в областта на газоснабдяването с природен газ на обществено-административни и битови потребители и свързаните с това дейности по проектиране, изграждане, въвеждане в експлоатация и поддръжка на сградни газови инсталации и предложения за актуализация. Проучена е Европейската практика в този сектор. Предложени са необходимите административни подходи и промени в действащото законодателство за по-ясно регламентиране на описаните дейности за гарантиране на надеждност и безопасна експлоатация на сградните газови инсталации.

**Ключови думи:** природен газ, нормативна уредба, стандарти, технически надзор, съоръжения с повишена степен на опасност

### Въведение

В Република България природният газ започва да се използва след средата на двадесети век. Първоначално, основно като суровина в химическата промишленост и гориво в топлоцентрали. В началото на 90-те години започва изграждането на градски газоразпределителни мрежи, което дава възможност природният газ широко да навлезе в промишления, обществен и битов сектор. В периода 60-те до началото на 90-те години на двадесети век България е част от социалистическия блок. Основно доставките на природен газ са от СССР. Поради ограниченото използване на природния газ и липсата на специализирано средно и висше образование за обучение на специалисти в областта на газоснабдяването в България, по това време всички норми и стандарти в тази област са заимствани от СССР. Регулирането на дейностите в областта на газоснабдяването от 1978 г. до 1990г. се осъществяваше основно от добре познатата тогава Наредба 21 за устройството и безопасната експлоатация на газови съоръжения и инсталации, която беше превод на съветските норми.

Впоследствие, за кратък период, бяха изготвени две нови наредби, познати като Наредби 3 и 4, които допълваха Наредба 21 в областта на новите технологии за изграждане на газоразпределителни мрежи.

В Република България през 1999 г. беше приет Законът за техническите изисквания към продуктите /ЗТИП/, а в края на 2003 г. беше приет и Законът за енергетиката /ЗЕ/. На база на ЗЕ, през 2004 г. бяха издадени НАРЕДБА за устройството и безопасната експлоатация на преносните и разпределителните газопроводи и на съоръженията,

инсталациите и уредите за природен газ и НАРЕДБА № 6 за технически правила и нормативи за проектиране, изграждане и ползване на обектите и съоръженията за пренос, съхранение, разпределение и доставка на природен газ.

Издадените от 2003 г. до днес включително в Република България закони и подзаконов нормативни актове, на база на които се извършват дейностите по газоснабдяване, са предмет на следващия:

### Анализ на действащата нормативна уредба в областта на газоснабдяването

Основно дейностите по пренос, разпределение и използване на природен газ са регламентирани в Закона за енергетика и издадените на база на чл. 200 от него, по ал.1: НАРЕДБА за устройството и безопасната експлоатация на преносните и разпределителните газопроводи и на съоръженията, инсталациите и уредите за природен газ и по ал. 2: НАРЕДБА № 6 за технически правила и нормативи за проектиране, изграждане и ползване на обектите и съоръженията за пренос, съхранение, разпределение и доставка на природен газ.

Логиката на изграждане, експлоатация, поддръжка и сервис на конкретен обект, предполага първо неговото проектиране, одобряване от специализираните органи и получаване на разрешение за строеж, т.е. прилагането на НАРЕДБА № 6 за технически правила и нормативи за проектиране, изграждане и ползване на обектите и съоръженията за пренос, съхранение, разпределение и доставка на природен газ и получаване на разрешение за

строеж на обекта съгласно Закона за устройство на територията /ЗУТ/. За съжаление, през 2015 г. в ЗУТ в чл. 151, т.10 е записано, че не се изисква разрешение за строеж за монтаж на сградни газови инсталации в жилищни и вилни сгради. В резултат на този запис в ЗУТ години след това, а и сега много проекти на сградни газови инсталации за битово газоснабдяване са изградени и въведени в експлоатация без разрешение за строеж.

На практика, за проектиране, изграждане, въвеждане в експлоатация, поддръжка и ремонт на сградни газови инсталации се прилага НАРЕДБА за устройството и безопасната експлоатация на преносните и разпределителните газопроводи и на съоръженията, инсталациите и уредите за природен газ. Тази практика е продиктувана и от факта, че наредбата по чл. 200, ал. 1 от ЗЕ е приета по предложение на министъра на енергетиката и председателя на Държавната агенция за метрологичен и технически надзор, докато наредбата по същия член, но ал. 2, е приета по предложение на министъра на регионалното развитие и благоустройството и министъра на енергетиката. Тъй като газовите инсталации са съоръжения с повишена степен на опасност /СПО/, те се контролират от технически надзор (държавен или лицензирани от него юридически лица). Надзорът, в своята дейност, прилага единствено и само наредбата по чл. 200, ал. 1 от ЗЕ.

В редица европейски държави с развита газификация като Италия, Испания, Англия, Германия и др. има служби, които създават собствени и/или внедряват чужди норми, стандарти и правила, които подобряват качеството на дейността и са в крак със съвременните постижения. Освен това самите дейности по пренос, съхранение, разпределение, промишлени и битови газови инсталации са разделени в отделни документи (наредби, наръчници и др.). Това е изключително важно и полезно, защото много качествено и конкретно се регламентират изискванията както към материалите и начинът за изпълнение на конкретните газови инсталации, така и към персонала, който ги изпълнява. Освен това, когато има необходимост от допълване или актуализация на изисквания към конкретна област, не се налага преработка на всички области (норми).

Как е в България:

В НАРЕДБА за устройството и безопасната експлоатация на преносните и разпределителните газопроводи и на съоръженията, инсталациите и уредите за природен газ:

- всички дейности (сектори) по пренос, съхранение, разпределение, промишлени и битови газови инсталации са включени;

- има препратки от сектор в сектор, въпреки че и за неспециалист е ясно, че изискванията към промишлени газови инсталации не могат директно да се пренасят и към сградните газови инсталации. Същото важи и за останалите сектори;

- изискванията към персонала за изграждане, поддръжка и ремонт също е уеднаквен. Това води до значително повишаване на цената на услугата за домакинствата. (В цитираните по-горе европейски държави изискванията към персонала, работещ в различните сектори, са различни, което повишава ефективността като цяло на услугата);

- изключително трудно и непрозрачно се случва актуализация на българската нормативна база в областта

на газоснабдяването, дори когато в световен мащаб се прилагат нови материали, одобрени по надлежния ред. Същевременно, като пример, може да се види, че през последните години на Наредбата по чл. 200, ал. 1 от ЗЕ ежегодно са правени средно по три “козметични” редакции, без те да са осигурили адекватност на документа спрямо съвременните тенденции в съответния сектор;

- не се привличат за изготвяне на промени и допълнения на действащите норми доказани в съответния сектор специалисти.

Следващият, важен за дейността газоснабдяване, нормативен акт е Законът за техническите изисквания към продуктите. Той регламентира основните изискванията към юридическите лица, техният персонал и материално-техническо осигуряване. Тези изисквания по обратен път се прехвърлят и конкретизират в НАРЕДБАТА за устройството и безопасната експлоатация на преносните и разпределителните газопроводи и на съоръженията, инсталациите и уредите за природен газ. Отново възниква въпросът, защо например, изискванията за извършване на дейности по пренос са същите както и за дейности по битово газоснабдяване. Това е увеличаване на административната тежест спрямо малкия и среден бизнес и води до необосновани разходи, които в крайна сметка ги плаща клиентът. При такова negliжиране на процеса от страна на държавата е естествен процесът по опити за заобикаляне на съществуващите административни изисквания, което в крайна сметка се отразява на качеството на услугата. А целта на всяка дейност, особено на свързаната със СПО, е тя да осигури безопасност, надеждност и ефективност.

## **Предложения за нова структура и актуализация на действащата нормативна уредба в областта на газоснабдяването**

Професионалният ми опит в проектирането, изграждането и експлоатацията на преносни, разпределителни, промишлени и сградни газови инсталации започва от 1995 г. През всичките тези години проблемите в Газоснабдяването си остават едни и същи, като основният е нормативната уредба, която по мое мнение, а и на други доказани професионалисти, е необходимо генерално да се промени в следните посоки:

I. Да се разделят отделните дейности на сектори:

- Сектор: Пренос и съхранение на природен газ;
- Сектор: Разпределение на природен газ;
- Сектор: Промислени газови уреди и инсталации;
- Сектор: Обществено-административни газови уреди и инсталации;
- Сектор: Битови газови уреди и инсталации.

II. За всеки сектор по т. 1. да има отделен документ (например наредба), която да се състои от отделни раздели:

- Раздел I: Проектиране;
- Раздел II: Материали (уреди, фитинги, тръби и др.), допустими за влагане в конкретните газови съоръжения и инсталации;

- Раздел III: Изисквания към персонала за изграждане, поддръжка, ремонт или преустройство на съответните газови уреди, мрежи или инсталации;

В този раздел е изключително важно за всеки сектор да

има конкретни изисквания и за юридическото лице, чрез което сертифицираният персонал ще извършва съответната дейност.

Например:

- За сектор: Пренос и съхранение на природен;
- За сектор Разпределение на природен газ;
- За сектор Промислени газови уреди и инсталации на природен газ,

да останат сега действащите изисквания в по чл. 36 от ЗТИП;

- За сектор Обществено-административни газови уреди и инсталации;

- За сектор Битови газови уреди и инсталации, да се разреши Управителят за (Е)ООД или изпълнителният директор за (Е)АД да може да изпълнява една или няколко позиции от изискванията на чл. 36 от ЗТИП.

За тези юридически лица да не се изисква отделно лице, което да изпълнява контрол на заварените съединения и проверка на влаганите материали, ако управителят е компетентен и може да го докаже със съответните документи.

Тези промени ще понижат значително административно-финансовата тежест върху малки и средни фирми, които са специализирани за изграждане на газови инсталации до 100 mbar (в сгради за обществено-административни и битови нужди), което като резултат ще понижи цената към клиентите и ще се увеличи броя на газифицираните домакинства.

- Раздел IV: Изграждане, изпитания и въвеждане в експлоатация на съответния сектор.

Изключително съществен момент е наличието в момента на лице, упражняващо технически надзор. Това е една институция, която участва в процеса при първоначално приемане на съответната газова инсталация (формално проверява сертификатите на материалите и извършените изпитания, за да издаде документ за въвеждане на инсталацията в експлоатация), както и всяка година подписва актове за проверка на същата газова инсталация. Въпросът е, защо е необходимо ползвателите на природен газ да плащат за формални проверки, след които отново те (ползвателите) остават отговорни за своите газови инсталации. Предложението ми в тази област с Технически надзор е за генерална промяна, както следва:

1. Съответната газова инсталация се изгражда от сертифициран персонал съгласно Раздел III от (т. II.);

2. Този изпълнител изготвя изпълнителска документация с чертежи, сертификати, протоколи от изпитания и т.н.;

3. Копие от така изготвената документация се представя в съответното газоразпределително предприятие, на база на която то присъединява съответния потребител. Задължително Изпълнителят провежда инструктаж на Ползвателя за работа с монтираните му газови уреди и инсталации и за действия при пропуск на газ или аварии. Инструктажът се удостоверява с подписи на страните.

4. Ежегодно Ползвателят е длъжен да осигури сертифицирана фирма (може и да е различна от изградилата газова инсталация), която да провери неговите газови уреди и инсталация за пропуски на газ и като цяло дали съответства на изпълнителската

документация. Проверката се вписва в експлоатационен дневник на газовата инсталация. Копие от този протокол Ползвателят предава на газоразпределителното предприятие, към чиято ГРМ е свързан. (тази схема на работа ще освободи ползвателите от бремето технически надзор, който ежегодно само взема такса без да гарантира качество на услугата, като същевременно Изпълнителят, който е сертифициран да изгражда газови инсталации, гарантира качествен годишен преглед.

Отново наблягам на факта, че Ползвателят е отговорен за изправността и безопасността на своята газова инсталация, затова трябва да му се осигури адекватна поддръжка, която не се реализира чрез тъй наречения Технически надзор.

От друга страна юридическите лица, които изпълняват СПО, ежегодно подлежат на проверки от държавния технически надзор, така че при тези проверки длъжностните лица ще проверяват и документацията на изградените газови инсталации.

Този подход ще осигури яснота и проследимост на изградените и ползвани газови инсталации и ще намали административно-финансовата тежест както за фирмите-изпълнители, така и за ползвателите на природен газ.

## Заклучение

Анализът на съществуващата нормативна уредба в областта на газоснабдяването показва, че съществуващото положение води основно до:

- намаляване на нивото на безопасност и ефективност на газовите инсталации,
- увеличаване на цената на услугата, в резултат на което намалява броя на желаещите да ползват природен газ;

Нужна е спешна генерална промяна на нормативна уредба в областта на газоснабдяването на база на добрите европейски и световни практики, адаптирани към българските условия от независими доказани експерти.

## Литература

- Бояджиев, М., Георгиев, Л. (2020). *Управление на газовата инфраструктура*. - Изд. къща МГУ “Св. Ив. Рилски”;
- Закон за устройство на територията /ЗУТ/ - в сила от 31.03.2001 г., последно изм. ДВ. бр.92 от 27 октомври 2020г.
- Закон за енергетиката /ЗЕ/; Обн. ДВ. бр.107 от 9 Декември 2003г., изм. и доп. ДВ. бр.41 от 21 май 2019г.
- Закон за техническите изисквания към продуктите /ЗТИП/; Обн., ДВ, бр. 86 от 1.10.1999 г.-последно изм. и доп. ДВ бр. 105 от 11.12.2020г.
- Наредба за устройството и безопасната експлоатация на преносните и разпределителните газопроводи, и на съоръженията, инсталациите и уредите за природен газ /НУБЕПРГСИУПГ/ - приета с ПМС № 171 от 16.07.2004 г.-изм ДВ бр.60 от 20.07.2018г.
- НАРЕДБА № 6 от 25.11.2004г. за технически правила и нормативи за проектиране, изграждане и ползване на обектите и съоръженията за пренос, съхранение, разпределение и доставка на природен газ.-изм ДВ бр.30 от 01.04.2014г.



## RESEARCH AND EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE OXYGEN MASS TRANSFER COEFFICIENT $K_La$ OF A NEW TYPE OF STIRRING DEVICE WITH A PLANETARY MECHANISM

*Evgeni Kraychev, Sotir Plochev, Anatoliy Angelov, Svetlozar Grozdanov*

*University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: evgeni.kraychev@mgu.bg*

**ABSTRACT.** The article presents the results regarding a research work and the experimental determining of the coefficient of mass transfer of oxygen  $K_La$ , for a new type of stirring device with a planetary mechanism. The stirring device is implemented in a laboratory reactor with a horizontal copper coil and a construction representing a planetary mechanism on which three energy-saving stirring *KS 3.1 PM* devices are mounted. Three different stirring and aeration modes were studied in a bioreactor for deep cultivation of aerobic microorganisms. The results obtained for the  $K_La$  value showed the highest values under combined aeration. The application of the studied stirrer is expected to be in the field of wastewater treatment and in aerobic bioreactors for the biotechnology industry.

**Keywords:** Oxygen mass transfer coefficient, bioreactor, stirring planetary mechanism, combined aeration.

### ИЗСЛЕДВАНЕ И ОПИТНО ОПРЕДЕЛЯНЕ НА КОЕФИЦИЕНТА НА МАСОПРЕНАСЯНЕ ПО КИСЛОРОД $K_La$ , НА НОВ ТИП ПРОПЕЛЕРНА БЪРКАЧКА С ПЛАНЕТАРЕН МЕХАНИЗЪМ

*Евгени Крайчев, Сотир Плочев, Анатолий Ангелов, Светлозар Грозданов*  
*Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София*

**РЕЗЮМЕ.** В настоящата публикация са представени резултати относно изследване и опитно определяне на коефициента на масопренасяне по кислород  $K_La$  за нов тип разбъркващо устройство с планетарен механизъм. Разбъркването се осъществява в лабораторен реактор с хоризонтално навита медна серпентина и конструкция представляваща планетарен механизъм на които са монтирани три енергоспестяващи бъркачки „КС 3.1 ПМ“. Изследвани са 3 различни режима на разбъркване и аерация в биореактор за дълбочинно култивиране на аеробни микроорганизми. Получените резултати за стойността на  $K_La$  показват най високи стойности при комбинирана аерация. Очаква се приложението на изследваната бъркачка да бъде в областта на пречистване на отпадъчни води и в аеробни биореактори за биотехнологичната промишленост.

**Ключови думи:** Коефициент на масопренасяне по кислород, биореактор, планетарен механизъм за разбъркване, комбинирана аерация.

### Introduction

One of the main factors for the successful operation of gas-liquid reactors is mass transfer in the gas-liquid system, which in turn depends on the hydrodynamic picture in the reactors, the mixing of phases, and the physicochemical properties of the medium. Determining the volumetric coefficient  $K_La$  in gas-liquid bioreactors is essential in order to establish the efficiency of aeration and to assess the influence of operating parameters on oxygen delivery in the system (Zedniková et al., 2018).

A major challenge is to develop a model that accurately describes the physical nature of mixing in two-phase reactors, takes into account the influence of multiple parameters, and is consistent with a wide range of experimental data. The contact between the two phases (liquid and gas) in the bioreactor primarily depends on its type, the stirring speed, and the gas bubble formation. Additionally, a third phase (solid particles) can be added, forming various suspensions that are stirred and, in some cases, form emulsions, depending on the solubility of the solid phase in different fluids.

The stirring is carried out by an agitator, which is an improved model of an energy-saving blade agitator with radial, axial, and tangential movements during mixing.

The mixing process is carried out by an innovative stirring device, which consists of a planetary mechanism mounted in an aluminium housing with three working elements. The three propeller stirrers also have a specific geometry and simultaneously perform rotational movement around their own axis and along an external gear ring (Fig. 1). In this way, radial, axial, and tangential velocity components are superimposed

(Kraychev, 2023). Due to the special shape of the blades, the stirred medium is attacked with the so-called "cutting edge".



**Fig. 1. Picture of the new stirring device with three working bodies.**

Experimental studies and test results regarding the hydrodynamic characteristics of the *KS 3.1 PM* device have been compared with classic stirrers, such as the six-blade *Rushton* turbine, the *Interprop*, *Intermig*, *Eleron-1* and *2*, and *NRE-KM* (Kraychev, 2014).

Typically, the rate of oxygen mass transfer occurs across the entire contact surface and relates to the working volume of the bioreactor. The driving force of this process is the difference between the equilibrium concentration and the current concentration of oxygen in the liquid phase:

$$\frac{dC_L}{dt} = k_L a (C_L^* - C_L) \quad (1)$$

The proportionality coefficient  $k_L a$  is called the volumetric mass transfer coefficient of oxygen and plays a significant role in aerobic processes, where  $C_L^*$  and  $C_L$  are the equilibrium and current oxygen concentrations, respectively. Several authors (Law et al., 2004; Vandu & Krishna, 2004) highlight the so-called "start-up dynamic method" as one of the most effective for determining  $k_L a$ .

**The main objective** of the current study is to determine the influence on the value of the oxygen mass transfer coefficient ( $k_L a$ ) under different aeration and mixing conditions using a new type of propeller stirrer with a planetary mechanism.

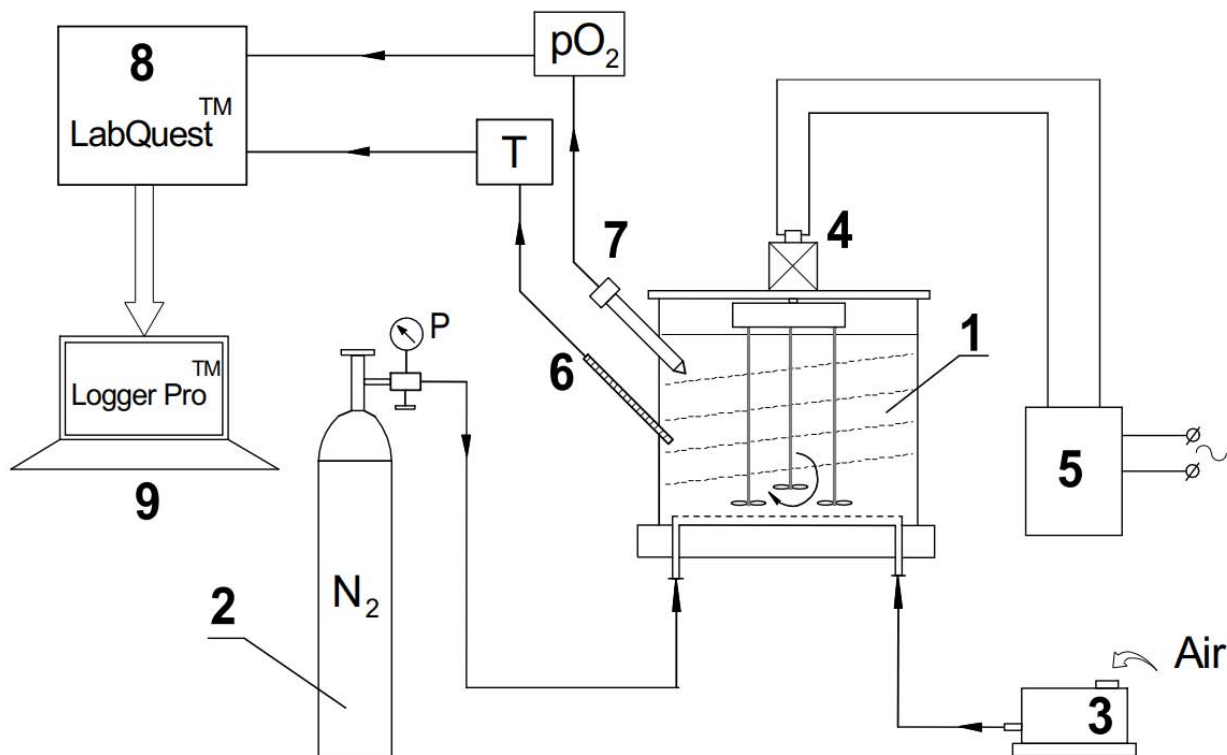
### Materials and methods

To achieve the objectives, the experiments were conducted in a laboratory installation (Fig. 1) including a laboratory semi-

industrial reactor (1) with a volume of  $V_R=14.3 \text{ dm}^3$ , made of plexiglass for better visualisation of the processes. The internal diameter of the reactor is 260 mm. It is standardly equipped with four baffle plates (deflectors) and a horizontally coiled copper coil with a length of  $L_{\text{coil}} = 7.94 \text{ m}$ . The baffles serve to avoid the "funnel effect" (liquid vortex), and a sparger is installed at the bottom of the reactor to saturate the medium with oxygen using an air pump (3) with a maximum flow rate of  $3.5 \text{ dm}^3/60\text{s}$ .

To determine the volumetric mass transfer coefficient  $k_L a$  in the reactor, a variant of the dynamic method ("start-up dynamic method") based on the oxygen balance in the liquid phase was used (Vandu & Krishna, 2004). For the purposes of the measurement, different aeration conditions were maintained, under which the concentration of dissolved oxygen reached a steady-state value.

The method was carried out as follows: initially, the dissolved oxygen in the liquid phase was removed by purging with  $N_2$  (2) until the dissolved oxygen content reached  $0.1 - 0.05 \text{ mg/l O}_2$ . Then, the system was re-aerated, and the concentration of dissolved oxygen  $C_L$  was immediately measured using an oxygen optical sensor – Vernier<sup>®</sup> DO-BTA (7) and the Logger Pro<sup>™</sup> and LabQuest interface. The data were recorded on a computer equipped with the Logger Pro<sup>™</sup> software (6).



**Fig.2. Scheme of the laboratory installation.** 1 – bioreactor with the stirrer- type KS 3.1 PM; 2 – nitrogen bottle; 3 – air pump; 4 – direct current motor; 5 – adjustable DC power supply, 6- temperature sensor, 7 – Vernier DO-BTA oxygen optical sensor; 8 – LabQuest interface, 9 – computer with the Logger Pro data recording software

The stirring speed was regulated by an autotransformer (5) and ranged from 340 to 360 rpm, while the design of the KS 3.1 PM stirrer included three stirring shafts mounted on a planetary mechanism (8). The blades of the stirring propellers (with a diameter of 40 mm) transferred the liquid to each other, with

movement in radial, axial, and tangential directions (Fig. 3 and 4). The diameter of the external gear (crown) was 90 mm, the planetary gears had a diameter of 35 mm, and the diameter of the gear on the input shaft was 20 mm. The actual stirring power was 26.2 W.



Fig. 3. Picture of the experimental setup.

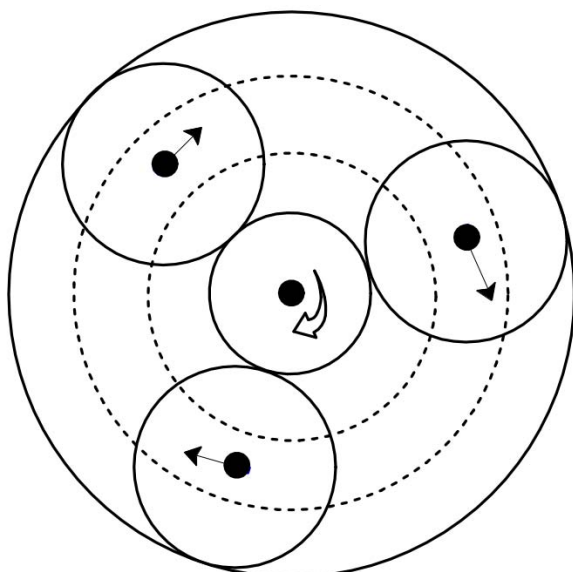


Fig. 4. Planetary mechanism of the KS 3.1 PM stirrer.

The three-blade propeller, conditionally called the "three-leaf clover" (Fig.5), was made of high-quality stainless steel, and the blades were cut and processed with high precision using a state-of-the-art laser (HARIS-1000).

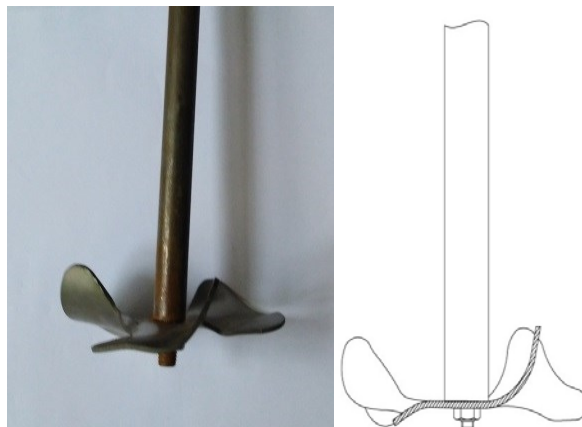


Fig. 5. Propeller of the KS 3.1 PM stirrer.

The mechanics of the stirrer, as well as the hydrodynamics, were presented in a previous publication (Kraychev, 2023). Measurements continued until the equilibrium concentration of oxygen was reached. The process is described by equation (1), and after its integration at  $t=0$ ,  $C_L^* = \text{const}$ , and  $C_L = C_{L,0}$ , assuming that initially there was no oxygen in the liquid phase  $C_{L,0} = 0$ , we obtain:

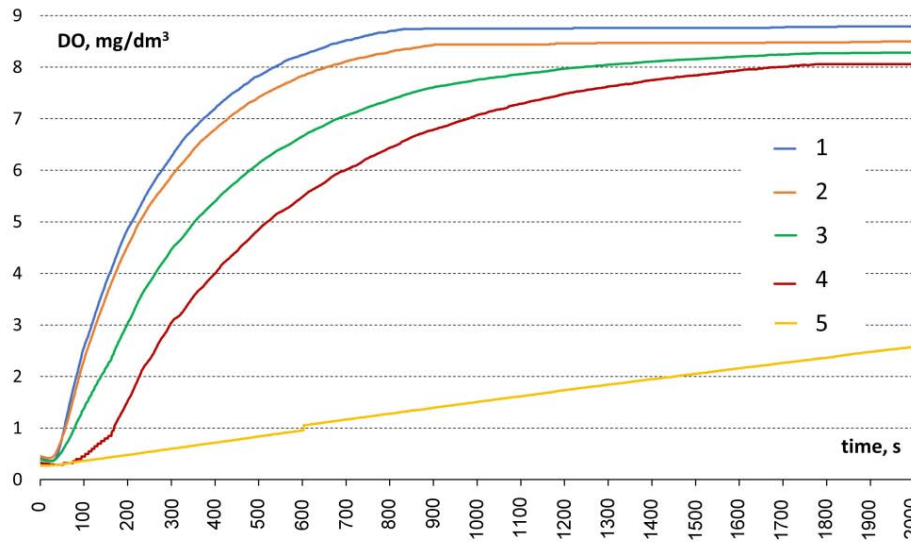
$$\ln \left[ \frac{C_L^*}{C_L^* - C_L} \right] = k_L a t \quad (2)$$

A graph of as a function of the time  $t$  was plotted, and from the slope of the resulting line, the volumetric mass transfer coefficient  $k_L a$  was calculated. The optimal stirring speed in stationary mode was chosen in the range of 340-360 rpm from a hydrodynamic perspective. The temperature of the fluid during the experiments was in the range of 16.9 - 21.7 °C. The density of water was 997 kg/m<sup>3</sup>. Experiments with emulsions of water and vegetable oil in different ratios with varying viscosities were also conducted.

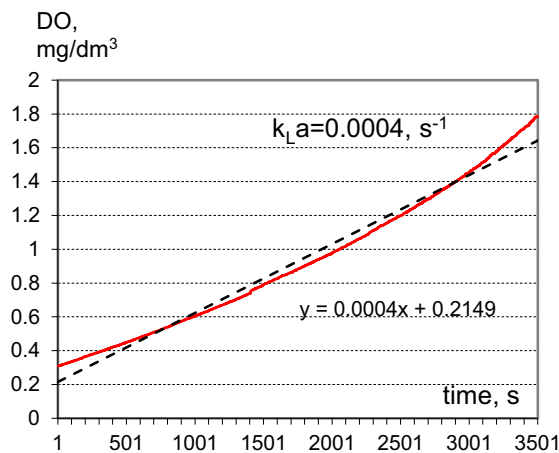
The application of the stirring device is very broad, for example, for aeration in wastewater Aerated Basin, or for suspending and aerating nutrient media in bioreactors for deep cultivation of microorganisms. Another application is in the pharmaceutical industry, specifically in the production of antibiotics, where the stirring time can reach up to 260 hours.

## Results and Discussion

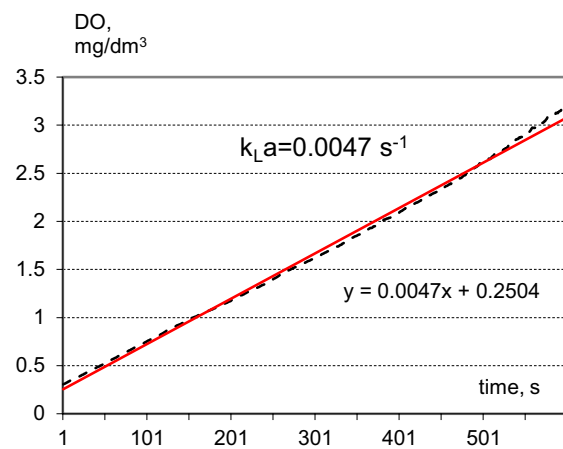
The obtained results are presented in Figs. 6, 7, 8, 9, 10 and Table 1. They show the highest values of the mass transfer coefficient for the variant with a maximum air flow rate of 3.5 dm<sup>3</sup>/60s and stirring.



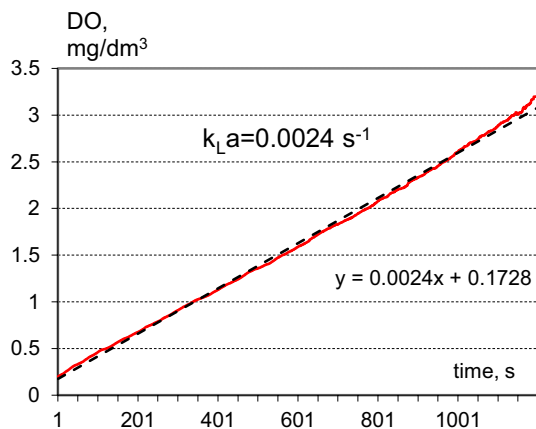
**Fig. 6. The change in the dissolved oxygen concentration under different aeration conditions.** 1 - values of dissolved oxygen for the variant with stirring and an air flow rate of 3.5 dm<sup>3</sup>/60s; 2 - values of dissolved oxygen for the variant with stirring and an air flow rate of 1.75 dm<sup>3</sup>/60s; 3 - values of dissolved oxygen for the variant without stirring and with an air flow rate of 3.5 dm<sup>3</sup>/60s; 4 - values of dissolved oxygen for the variant without stirring and an air flow rate of 1.75 dm<sup>3</sup>/60s; 5 - values of dissolved oxygen for the variant with stirring and without additional air supply.



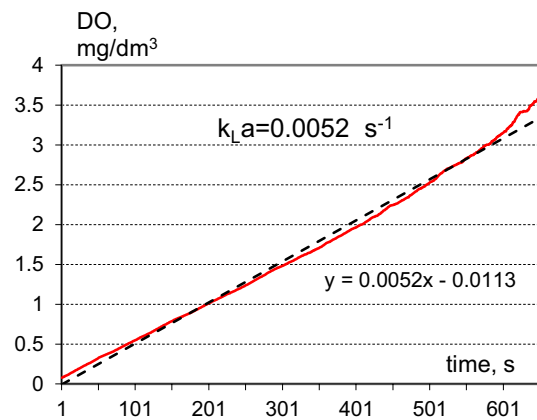
**Fig. 7. Time values of dissolved oxygen and  $K_L a$  for the variant with stirring, without additional air supply.**



**Fig. 9. Time values of dissolved oxygen and  $K_L a$  for the variant without stirring and a maximum air flow rate of 3.5 dm<sup>3</sup>/60s.**



**Fig. 8. Time values of dissolved oxygen and  $K_L a$  for the variant without stirring and with an air flow rate of 1.75 dm<sup>3</sup>/60s.**



**Fig. 10. Time values of dissolved oxygen and  $K_L a$  for the variant with stirring and a maximum air flow rate of 3.5 dm<sup>3</sup>/60s.**



The results obtained from the four variants of energy input through the gas and liquid phases in the bioreactor show significant differences in terms of the time required to reach the equilibrium concentration of oxygen in the medium (Fig. 6). Specifically, in the variant without air supply (stirring only), it was found that the potential for air injection into the medium by the tested stirrer was not sufficiently high, and within the standard measurement time of 2000 s, the experimentally established equilibrium oxygen saturation concentration of 8.1-8.6 mg/dm<sup>3</sup> was not reached. This variant also showed the lowest value of  $k_La = 0.0004 \text{ s}^{-1}$  (Fig. 7).

In the variant without stirring and with an air flow rate of 1.75 dm<sup>3</sup>/60s (Fig. 8), the equilibrium concentration of oxygen was reached after 901 s, with a  $k_La$  value of 0.0024 s<sup>-1</sup>. In the identical variant with stirring and an air flow rate of 1.75 dm<sup>3</sup>/60s (Table 1), the  $k_La$  value reached 0.0027 s<sup>-1</sup>.

Table 1. Values of  $k_La$  for different stirring and aeration variants.

Aeration mode	Without aeration	Aeration 1,75 dm <sup>3</sup> /60s	Aeration 3,5 dm <sup>3</sup> /60s
$k_La, \text{ s}^{-1}$			
With stirring	0,0004	0,0027	0,0052
Without stirring	-	0,0024	0,0047

The best results were obtained in the variants with stirring and two different air flow rates. The equilibrium concentration of oxygen at the lower flow rate (1.75 dm<sup>3</sup>/60s) was reached after 827 s, whereas at the higher flow rate (3.5 dm<sup>3</sup>/60s) it was reached after 725 s. These two variants also showed the highest  $k_La$  values, respectively 0.0047 s<sup>-1</sup> and 0.0052 s<sup>-1</sup> (Figs. 9 and 10, and Table 1).

In similar studies conducted with a column-type photobioreactor (Angelov et al., 2019), similar results were obtained for the oxygen mass transfer coefficient in the range of 0.0060-0.0067 s<sup>-1</sup>, which can be explained by the longer residence time of the gas phase in the column-type bioreactor.

## Conclusion

A new stirring device with a planetary mechanism and three working elements (propeller stirrers) with specific, modified

blade geometry has been designed, developed, and put into operation. The oxygen mass transfer coefficient,  $k_La, \text{ s}^{-1}$ , was experimentally determined and tested. According to the results from the experimental studies, the KS 3.1 PM propeller stirrer belongs to the category of energy-saving stirrers due to its power coefficient and dimensionless Reynolds number.

In general, its application is in the chemical, pharmaceutical, food, and biotechnological industries.

## References

- Anatoliy, A., Kraichev, E., Lecheva, M., Plochev, S. (2019). Volumetric coefficient of oxygen mass transfer analysis in column photobioreactor, *Journal of Mining and Geological Sciences, Vol 62, Part II*, 119–123. ISSN: 2683-0027(online).
- Decheva S., Hinkov, I., Karsheva, M., Dyankov, S. (2013). Modeling of hydrodynamics in cylindrical vessels with agitation, *Food Science, Engineering and Technologies*, Plovdiv, October 18-19, 2013.
- Kraychev E., Yordanov, V. (2003), Heat transfer during agitation in liquid medium in a laboratory reactor with a new type of axial impeller, *EMF TU-Sofia*.
- Kraychev E., Yordanov, V., Popova, I. (2004), Experimental determination of the power coefficient of a new type of mechanically stirring device - axial impeller, *EMF TU-Sofia*.
- Lau, R., Peng, W., Velazquez-Vargas, L. G., Yang, G. Q., & Fan, L.-S. (2004). Gas-Liquid Mass Transfer in High-Pressure Bubble Columns. *Industrial & Engineering Chemistry Research, 43(5)*, 1302–1311. doi:10.1021/ie030416w
- Vandu, C. O., & Krishna, R. (2004). Influence of scale on the volumetric mass transfer coefficients in bubble columns. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 43(4)*, 575–579. doi:10.1016/s0255-2701(03)00015-1
- Zedniková, M., Orvalho, S., Fialová, M., & Ruzicka, M. (2018). Measurement of Volumetric Mass Transfer Coefficient in Bubble Columns. *ChemEngineering, 2(2)*, 19. doi:10.3390/chemengineering2020019



## HYDROGEN STORAGE IN UNDERGROUND GAS RESERVOIRS

Veselin Mitkov

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: veselin.mitkov@mgu.bg

**ABSTRACT.** The article analyses the prospects and opportunities for storing gas-hydrogen mixtures in underground gas storage facilities. The main processes occurring in the wellbore-productive reservoir system during storage of gas-hydrocarbon mixtures are presented. The main processes occurring in the borehole-productive reservoir system depend on the amount of hydrogen in the natural gas. The challenges associated with the feasibility of storing gas-hydrogen mixtures in porous rock are discussed. The storage of gas-hydrogen mixtures in constructed underground gas storage facilities is necessary in connection with the compensation of consumption irregularities of gas-hydrogen mixtures.

**Key words:** hydrogen, underground storage

### СЪХРАНЯВАНЕ НА ВОДОРОД В ПОДЗЕМНИ ГАЗОХРАНИЛИЩА

Веселин Митков

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

**РЕЗЮМЕ.** В статията са анализирани перспективите и възможностите за съхраняване на газо-водородни смеси в подземни газохранилища. Представени са основните процеси които протичат в системата сондаж-продуктивен хоризонт при съхранение на газо-водородни смеси. Основните процеси протичащи в системата сондаж-продуктивен хоризонт зависят от количеството на водород в природния газ. Разгледани са предизвикателствата свързани с възможностите за съхраняване на газо-водородни смеси в порести скали. Съхраняването на газо-водородни смеси в изградени подземни газохранилища е необходимо във връзка с компенсиране на неравномерността на потреблението на газо-водородни смеси.

**Ключови думи:** водород, подземно газохранилище

### Introduction

The continuous growth of the world's population and economy, combined with rapid urbanisation, has led to a huge increase in energy consumption. The classical trend of energy consumption depends on hydrocarbon energy resources, which are depletable and limited by geographical distribution and techno-economic and environmental production. The ways in which we have used fossil fuels as our main source of energy since the industrial revolution have led to a huge increase in the levels of CO<sub>2</sub> and other greenhouse gases in the atmosphere, which is one of the main causes of global warming. Renewable energy resources are likely to play a key role in the transition to a clean and sustainable energy system and global energy security. The innovative idea of storing renewable energy in an energy source such as hydrogen, which can be produced, transported, stored in underground gas reservoirs, and used alone or as gas-hydrogen mixtures, is a major solution to a range of environmental, energy, and geopolitical problems. The main prospects and opportunities for storing gas-hydrogen mixtures are in underground gas reservoirs created in depleted gas fields, aquifers, and salt domes.

### Physicochemical properties of hydrogen

Hydrogen (H<sub>2</sub>) is the most abundant element in the universe, occurring on our planet Earth mainly in water and organic compounds. At standard temperature and pressure, hydrogen is a colourless, odourless, non-toxic, non-metallic, and flammable diatomic gas. The atomic mass of hydrogen is 1.00794 [u], it is the lightest chemical element. Hydrogen is characterised by being extremely flammable. Hydrogen is non-toxic and is much lighter than air, dissipating quickly when released, allowing the fuel to dissipate relatively quickly in the event of a leak, making

it relatively safer than other fuels. The main safety concern is that if the leak is not detected and the gas collects in a confined space, it could ignite and cause an explosion. Some of the properties of hydrogen require additional engineering controls to ensure its safe use, such as the wide range of flammable concentrations in air (4 - 75%) and the lower ignition energy (*only a tenth of the ignition energy compared to gasoline*). Hydrogen has the ability to pass through materials due to the small size of its molecules and has a destructive capability (hydrogen embrittlement) that can lead to mechanical degradation and failure to the point of leakage in some materials.

Hydrogen has a higher energy density mass (~120 MJ kg<sup>-1</sup>) compared to hydrocarbons. However, its low density (0.084 kg.m<sup>-3</sup> at 20°C and 0.1 MPa) means that more volumetric storage capacity will be needed compared to natural gas to provide the same energy output. Large quantities of hydrogen will therefore need to be stored and the most suitable options are underground geological structures. Underground hydrogen storage can be a safe and long-term solution to store large amounts of energy during peaks in consumption, and can be quickly produced during irregular energy use. Underground storage of gas-hydrogen will be developed prosperously in the long term, which is expected to reach 20-100 million tons by 2050.

### Processes occurring in the wellbore-productive horizon system during storage of gas-hydrocarbon mixtures

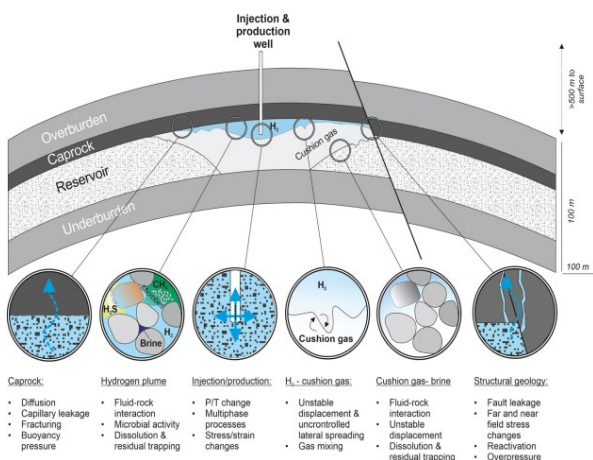
The main processes occurring in the wellbore-productive horizon system depend on the amount of hydrogen in the natural gas. The main negative processes associated with underground

storage of hydrogen in porous rock/bedrock (in depleted gas fields) are:

- contamination due to the contact of hydrogen with solids and liquids in the productive horizon;
- formation of hydrogen sulphide (H<sub>2</sub>S), which is a corrosive and poisonous gas; this is due to the activity of microorganisms inside the productive horizon, resulting in the loss of hydrogen reserves;
- loss of hydrogen-gas mixture due to the low density and high diffusivity of hydrogen. It is therefore possible for hydrogen to migrate from the productive horizon through the caprock screen, which would be significantly less if we were pumping natural gas in this case.

The main processes occurring in the wellbore-productive horizon system during the storage of gas-hydrocarbon mixtures are shown in Figure 1.

Hydrogen has very different physical and chemical properties compared to other fluids stored in geological objects, such as CH<sub>4</sub>, air, or CO<sub>2</sub>. Hydrogen can react with the rock formation and formation fluids, which can affect technological storage operations. The presence of hydrogen in the reservoir can cause the development of hydrogen-consuming microorganisms. Due to the cyclic injection and production of hydrogen from the underground storage, it is possible that this could compromise the integrity of the caprock. Therefore, in the context of these complex technological processes taking place in underground hydrogen storage facilities, it is necessary to define specific geological and technical characteristics. This is related to ensuring the safe and economical injection and production of hydrogen stored in underground gas storage facilities. Uncertainties associated with potential hydrogen leakage, as well as other risks, such as induced seismicity and hydrogen loss due to microbial activity, should be studied and assessed specifically for each underground gas storage facility.



**Fig. 1 Processes occurring in the borehole-productive reservoir system during storage of gas-hydrogen mixtures in an underground gas storage facility. (Heinemann N., Alcalde J., et al. Energy Environ. Sci., 2021,14, 853)**

Microbial growth is known to be critical for hydrocarbon reservoirs, and is also thought to be important for the ability to store hydrogen. Although several studies have examined the use of hydrogen at natural concentrations, little is known about the impact that the high hydrogen pressures expected in underground hydrogen storage will have on the underground microbial system. A number of classes of microorganisms, including methanogens, sulfate-reducers, homoacetogenic

bacteria, and iron (III)-reducers, are considered to be major consumers of hydrogen and are commonly present in bedrock formations and their saturating formation waters. The potential impact of microorganisms is controlled by parameters, such as temperature, salt concentration, pH, and substrate supply, and there are optimal and critical values of these parameters for each class of microorganisms. However, the composition of the microbial diversity presents great uncertainty due to the uncultivability of many subsurface microorganisms and the risk of accidental introduction of allochthonous organisms from the surface or surface gas and/or drilling fluid during storage. (*Allochthonous Organisms - Describing an organism that originated in a place other than where it is found. An organism is usually a transient member of an environment*). Other uncertainties include the nutrient requirements of bacteria in mixed cultures and the supply of nutrients to the subsurface, as well as the effects of pressure on microbial metabolism, including the toxicity of high hydrogen pressure to some microorganisms. Studying these issues is critical to determining the potential loss of hydrogen from underground gas reservoirs. The main impact of microorganisms on hydrogen storage is the permanent loss of hydrogen due to the conversion of hydrogen to products such as CH<sub>4</sub> or H<sub>2</sub>S. As microbial population densities increase, the biofilm or mineral precipitates formed by microorganisms can lead to blockage of pore space and, therefore, reduce the ability to inject and produce hydrogen. Loss of injectivity or reduction in yield due to biological activity is an issue that will need to be analysed for each specific underground gas reservoir.

Cyclic hydrogen injection and production leads to cyclic changes in pressure and on reservoir rock and fracture zone behavior, short- and long-term chemical interaction of hydrogen on the reservoir, and *stress-strain-absorption* on mechanical and transport behavior, all of which can have critical impacts on reservoir integrity. Hydrogen injection under pressure directly leads to chemical, temperature and barometric changes in the productive horizon, in nearby fracture zones and in the downhole zone of injection wells. The sorption of hydrogen to (swelling) clay minerals in clay reservoirs, caprocks, and faults can cause problems associated with the swelling of reservoir rocks and these changes will increase the stress inside the reservoir. During the lifetime of a hydrogen gas storage reservoir, repeated cycles of dry hydrogen injection can lead to widespread reservoir "drying", especially in the case of depleted hydrocarbon reservoirs containing mostly formation water.

Unwanted loss of hydrogen during storage is an economic, safety, and environmental concern for all gas storage. To minimise this risk during hydrogen storage, underground storage sites must be carefully selected and their integrity evaluated, and technological storage operations must be accompanied by continuous monitoring and control systems. Although hydrogen has been safely produced, stored, transported, and used in limited industrial operations for decades, extensive scientific experimental work on containment and destruction processes, as well as on risks known from other gas storage operations, is needed to provide accurate data for quantitative risk assessments of hydrogen storage. Within the gas transmission system, a number of projects, such as the H21 Spadeadam and HyHouse, have shown that hydrogen does not carry increased safety risks.

To ensure rapid detection of loss of containment from gas storage, it is imperative that underground hydrogen storage operations include a continuous management, measurement,

monitoring, and control system. The continuous monitoring and control system for underground storage of gaseous-hydrocarbon mixtures must have unlimited capability of:

- ensuring safe controlled operations during hydrogen injection and production;
- computer modelling of the eventual hydrogen migration in the reservoir rock;
- computer modelling and control of formation water displacement as a result of pore space pressure changes;
- identification of possible hydrogen leakage areas.

A continuous management, measurement, monitoring, and control system for hydrogen storage in porous rock is based on proven multidisciplinary concepts applied in other fluid storage facilities, such as underground natural gas storage or underground CO<sub>2</sub> storage, incorporating geophysical, geological, hydro-gas-dynamic, geochemical and microbiological models. These models allow controlling and managing the processes occurring in the downhole zone of the well, the productive horizon, and the surface facilities in the process of injection and production of gas-hydrocarbon mixtures in and from an underground gas reservoir.

### Main site selection criteria and description of criteria

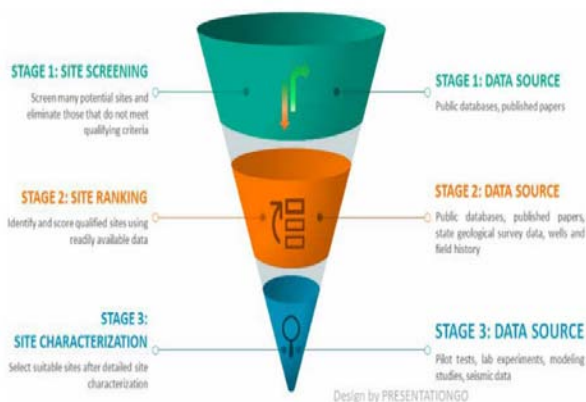
The main criteria for selecting a site for underground hydrogen storage are:

- conditions to prevent negative processes in the downhole zone of the well and the productive horizon;
- sufficient injection capacity and extraction capability;
- low risk of loss of tightness or seismic activity;
- low production costs.

The rational selection of sites for underground storage is divided into three main stages:

1. Inspection of the sites.
2. Ranking (*classification*) of the sites.
3. Characterisation of the sites.

Fig. 2 presents the site selection process for underground hydrogen storage.



**Fig.2 Underground hydrogen storage site selection process (Okoroafor E. R., T. W. Kim, et al. *Assessing the Underground Hydrogen Storage Potential of Depleted Gas Fields in Northern California 2022*)**

The workflow involves the use and analysis of databases consisting of geological surveys, geophysical surveys, geochemical surveys, information from drilled boreholes,

laboratory studies of core and formation fluids, hydro-gas-dynamic studies conducted in boreholes, reservoir performance data in the production and injection cycle. *The data required at each stage and the complexity of the analysis increases as the number of underground gas reservoirs assessed decreases.*

1. Screening (Verification) of underground gas reservoirs is the first stage in which many potential sites are eliminated because they do not meet the thresholds for capacity, production, and injection performance, geological, economic, and planning considerations. Sites that meet these qualification criteria proceed to Stage 2.
2. The ranking of the sites that met the thresholds at the verification stage receive a score between 1 and 5 for each criterion. Each site receives a technical assessment that combines the assessments of the capacity and surge optimisation and geomechanical risk minimisation criteria, an assessment of location and economic constraints, and a combined overall assessment. The investor determines the weight of each criterion based on the most important parameters for their project. The sites with the highest rating proceed to the site characterisation stage.
3. The site characterisation is the final stage, where the highest-ranking sites from Stage 2 are analysed in detail in order to enable the investor to identify the most appropriate underground gas storage facilities. At this stage, it may be necessary to carry out additional hydraulic and gas dynamic studies in the boreholes.

### Conclusion

Hydrogen is an emerging energy carrier to help decarbonise the world's energy and industrial sectors. Underground hydrogen storage has strong long-term growth potential, expected to reach 20-100 million tons by 2050. Salt caverns (domes) and depleted gas fields, if properly selected, can offer a feasible solution for long-term and safe storage of large quantities of hydrogen. The main challenges in hydrogen storage include the cost and loss of hydrogen when it is recovered from underground storage. Hydrogen losses are mainly due to geochemical and biochemical reactions as well as leakage and diffusion and the need for buffer gas; hydrogen injection and storage in aquifers shows that the main challenges are losses due to microbiological biochemical losses.

### References

Boyardjiev, M., Georgiev L. (2020). *Running of gas infrastructure*. University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, Sofia, Bulgaria, 180 p. ISBN 978-954-353-428-9. (in Bulgarian).

Karadjov, M. (2022). Design, construction, maintenance and service of domestic hybrid systems using natural gas. *Mining and Geology magazine*, no. 9, Sofia, ISSN 0861 – 5713 (Print), ISSN 2603 – 4549 (Online), pp. 42-46 (in Bulgarian).

Gerov, L. (2019). *Natural gas production and storage*. UMG “St. Ivan Rilski”, Sofia, 297 pp. (in Bulgarian).

Vucheva, R., Ivanova, M. (2020). On the determination of the function for stress in transversally isotropic rock mass with elliptic opening, *Annual of the Mining and Geological University “St. Ivan Rilski”, Sofia Vol.63, St. III.*

- Esuru Rita Okoroafor, Tae Wook Kim, Nazari N., Watkins H. Y., Saltzer S. D., and Kovscek A. R., (2022). *Assessing the Underground Hydrogen Storage Potential of Depleted Gas Fields in Northern California*, Stanford University
- Cavanagh, A.J., Yousefi, S.H., Wilkinson, M. & Groenenberg, R.M. (2022). *Hydrogen storage potential of existing European gas storage sites in depleted gas fields and aquifers*. H2020 HyUSPRe project report, The University of Edinburgh, Edinburgh, Scotland and TNO, Geological Survey of the Netherlands, Utrecht, The Netherlands
- Laban M. P. (2020) *Hydrogen storage in salt caverns. Chemical modelling and analysis of large-scale hydrogen storage in underground salt caverns*, Delft University of Technology
- Furat Dawood, Martin Anda M., Shafiullah, G.M. (2022) *Hydrogen production for energy: An overview*, College of Science, Health, Engineering and Education, Murdoch University, Perth, WA, Australia
- Chiara Tritto, Michela De Simoni, Roccaro E., Pontiggia M., Panfilia P., Lucilla del Gaudio, Visconti L., Iorio V. S., Gianluca dell'Elce. (2022). *Underground Hydrogen Storage in Depleted Gas Reservoirs: Opportunity Identification and Project Maturation Steps*, Eni S.p.A, San Donato Milanese (MI), Italy
- Heinemann, N., Alcalde, J., Miodic, J. M., Hangx, S. T. J., Kallmeyer, J., Ostertag-Henning, C., Hassanpouryouzband A., Thaysen E. M., Strobel, G.J., Schmidt-Hattenberger, C., Edlmann, K., Wilkinson, M., Bentham, M., Haszeldine, S., Carbonell, R., and Rudloff, A., (2021). Enabling large-scale hydrogen storage in porous media – the scientific challenges, *Energy Environ. Sci.*
- Gaffney Cline, (2022). *Underground Hydrogen Storage*, [www.gaffneycline.com](http://www.gaffneycline.com)
- Anna, S. Lord, Peter, H., Kobos, David, Borns, J., *Geologic Storage of Hydrogen: Scaling up to Meet City Transportation Demand*
- Carden, P.O., Paterson, L. (1979). Physical, chemical and energy aspects of underground hydrogen storage, *Int. J. Hydrog. Energy* 4 (6), 559–569, 1979
- Panfilov M. (2016). Underground and pipeline hydrogen storage. In *Compendium of Hydrogen Energy*, pages 91–115, *Elsevier*, 2016.
- Basic Hydrogen Properties, <https://h2tools.org/hyarc/hydrogen-data/basic-hydrogen-properties>
- Hydrogen conversions calculator, <https://h2tools.org/hyarc/calculator-tools/hydrogen-conversions-calculator>

# IMPROVING THE CEMENTING OF OIL AND GAS WELLS PRODUCTION STRINGS WITH HYDROPHOBIC MATERIALS OF THE “RAMSINKS – 2” GROUP IN VARIOUS MINING AND GEOLOGICAL CONDITIONS

**Oleksandr Nalivayko<sup>1</sup>, Valery Mitkov<sup>2</sup>, Oleksandr Romashko<sup>3</sup>, Zdravka Mollova<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, 61002 Kharkiv; E-mail: nalivayko.60@ukr.net

<sup>2</sup>University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: valery.mitkov@mgu.bg

<sup>3</sup>O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, 61002 Kharkiv; E-mail: romashko.imem@gmail.com

<sup>4</sup>University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: z.mollova@mgu.bg

Corresponding author: nalivayko.60@ukr.net

**ABSTRACT.** Under laboratory conditions, samples of the “Silpan-P” cement slurries (the “Ramsinks – 2” group) have been tested to improve the quality of delineation of water and gas bearing strata by improving the technology of cementing production strings of oil and gas wells in the drilling department of “Ukrburgaz” (for intermediate and production casing), especially in the presence of closely located productive formations and aquifers with different coefficients of anomalies. The use of the “Silpan-P” hydrophobic plugging solution was proven to be reasonable. Physical, chemical, and mechanical properties of the “Silpan-P” plugging hydrophobic solution significantly improve the isolation of productive formations at the stages of well completion.

**Key words:** reservoir column, well, cement, hydrophobic solution, hydrophobic addendum

## ПОДОБРЯВАНЕ НА ЦИМЕНТИРАНЕТО НА ПРОИЗВОДСТВЕНИТЕ КОЛОНИ В НЕФТНИ И ГАЗОВИ СОНДАЖИ С ХИДРОФОБНИ МАТЕРИАЛИ ОТ ГРУПАТА „RAMSINKS – 2“ ПРИ РАЗЛИЧНИ МИННИ И ГЕОЛОЖКИ УСЛОВИЯ

**Олександр Наливайко<sup>1</sup>, Валери Митков<sup>2</sup>, Олександр Ромашко<sup>3</sup>, Здравка Моллова<sup>4</sup>**

<sup>1,3</sup>Харковски национален университет по градска икономика „О. М. Бекетов“, Украйна

<sup>2,4</sup>Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“ – София

**РЕЗЮМЕ:** Пробни от течен циментов разтвор «Силпан-П» (група „Рамсинкс – 2“) са тествани в лабораторни условия за подобряване на качеството на оконтуряване на водо- и газоносни пластове чрез усъвършенстване на технологията за циментиране на производствени колони в нефтени и газови кладенци в сондажния отдел на „Укрбургаз“ (за междинни и производствени обсадни колони), особено при наличие на близко разположени продуктивни пластове и водоносни хоризонти с различни коефициенти на аномалии. Използването на хидрофобния тампонажен разтвор „Силпан-П“ се оказва целесъобразно. Физическите, химичните и механичните свойства на тампониращия хидрофобен разтвор „Силпан-П“ значително подобряват изолацията на продуктивните пластове при етапите на завършване на кладенеца.

**Ключови думи:** резервоарна колона, кладенец, цимент, хидрофобен разтвор, хидрофобна добавка

## Introduction

The analysis of special literature sources and production and construction data show that in various fields from 10% to 50% of oil and up to 60% of gas wells have mutinous flows and are therefore partially or completely unsuitable for effective operation, so the success of well cementing operations is determined by the technique and technology of cementing processes, the quality of preparatory work, cementing material, and the completeness of replacement of drilling mud with cementing material.

The relevance of developing new cements for cementing is caused by the need to improve the quality of productive formations insulation at different stages of well commissioning and operation. As the depth of oil and gas wells increases, formation temperatures and pressures rise, making it more difficult to separate formations in wells.

## Literature Analysis

The purpose of this work «Improvement of cementing of oil and gas wells production strings with hydrophobic materials of the «Ramsinks-2» group in various mining and geological conditions» is a laboratory study and industrial testing of the characteristics of the introduction of a new hydrophobic

cementing solution with the following composition: nitrilotrimethyl phosphonic acid (NTFPA), «Ramsinks-2» hydrophobising additive, and PCT–1–100 grouting cement (further «Silpan-P» reagent), (Nalivayko, 2005; 2021).

A wide variety of geological and technological conditions for drilling and cementing wells necessitated the development of special cementing cements. Among them are slag-sand cements, which are used for cementing oil and gas wells at elevated temperatures, USHTS weighted slag cement plugging cements, used in conditions of abnormally high reservoir pressures (AHRP) at temperatures from 80 to 250°C, weighted grouting cements for moderate temperatures WGC, which are used for cementing casing strings at a temperature of 50-100°C in the conditions of the AHRP and intervals of salt deposits (Gleeson et al., 2010; Oreshkin, 2010).

Ukrainian scientists M. A. Myslyuk, I. Y. Rybchych, Y. S. Kotskulych, V. M. Svitlytsky, and D. V. Oreshkin made a significant contribution to the development of such issues as accident prevention, fastening, cementing, and plugging materials (Oreshkin, 2010).

At the same time, due to their physical-mechanical and physical-chemical properties, the existing grouting solutions (for example PCT 1-100) do not fully meet the quality requirements for the cementing of production wells.



### Previous experience with various grouting materials

Nowadays, in order to improve the quality of grouting cement mortars, various additives are added to their production to improve their properties. We have proposed the latest cement mortar containing the hydrophobic additive «Ramsinks-2». This cement mortar (hereinafter referred to as «Silpan-P» cement mixtures) is intended to be used when passing through intervals of productive formations, taking into account specific geological and technological conditions, and to prevent inter casing flows during cement hardening. The mechanism of action is to regulate the technological parameters of the cementing mud with silicon-organic materials from the «Ramsinks-2» range, which leads to an overall improvement in the quality of the well cementing technology (Nalyvaiko, 2005).

Previous experience with various grouting materials allows us to foresee the possibility of creating a wide range of formulations with differentiated strength gain rates. The grouting cement must be well wettable and at the same time hygroscopically low.

The properties of hydrophobic cement that determine its technical and economic efficiency are as follows:

- hydrophobising properties facilitate the grinding of cement clinker, i.e., they intensify the grinding of cement, which increases the productivity of grinding plants at factories;

- hydrophobised cement powder is practically non-hygroscopic, so it is able to retain its activity during long-term storage even in humid conditions.

The hydrophobic additive should not reduce the strength of the cement stone, increase its permeability, or increase the viscosity of the mortar; it should prolong the preservation of cement by reducing its hygroscopicity (Iken et al., 2003).

The physical and mechanical properties of existing grouting cements and the «Silpan-P» hydrophobic grouting compound were studied in the laboratory and it was proven that the strength of the «Silpan-P» compound increased by 3-5 times and the water separation by up to 10 times.

The scientific novelty of the proposed technical solution is that, in comparison with the existing ones, it is proposed to produce and use hydrophobic grouting fluids with lower grouting fluid density ranges, high stability, improved pumpability, and high strength of the hardened stone, which guarantees the reliability of isolation of productive horizons.

The use of PTC 1-100 cement is widely recognised. Additionally, there is some experience with the «Ramsinks-2M» hydrophobic material. This material has successfully undergone industry laboratory tests at Ukrburgaz in Poltava, as well as in the physical research sector of the rock research department at UkrNDIGas reserves in Kharkiv, followed by pilot tests at Ukrnafta's fields. The material exhibited insulating effects on the pore surfaces of the reservoir rock. According to the authors, this physicochemical mechanism, when combined with PTC 1-100 cement, is expected to significantly enhance the properties of cementing materials, ultimately preventing formation flows.

The use of the «Ramsinks-2» hydrophobic material in the manufacture of the «Silpan-P» grouting cement mixture («Ramsinks-2» hydrophobic additive + PCT-1-100 + NTFPA) helps to increase the elasticity of PCT-1-100, prevents uneven concentration of fillers, and also prevents delamination of the mixture, increases resistance to aggressive factors, and increases their durability. High water resistance is achieved through the fine decomposition of hydrophobic particles in the SMN-20 mixer (Klymenko, 2016; Nalyvaiko, 2021).

These advantages of the newest «Silpan-P» hydrophobic cementing material will allow the use of these hydrophobic cements for cementing oil and gas wells in the AHRP zones, which meets the criterion of industrial use.

### Laboratory tests

Laboratory tests were conducted using a mixture of PTC 1-100 cement and «Ramsinks-2» hydrophobic material.

Test conditions:

- room temperature 20 °C;
- atmospheric pressure 742 mm Hg; air humidity 78 %;
- pressure in the autoclave unit - 450 atm, temperature 75 °C.

The main indicators of the quality and effective use of the «Ramsinks-2» additive are: hydrophobic effect (degree); water absorption of cements and mortars; strength; water resistance; plasticity, etc.

To form the cement stone from the «Silpan-P» cement mixture, the A-2.00.000.IE autoclave unit was used in combination with a special device for installing metal molds with samples, whose function is to prevent sample destruction.

Cylindrical stone samples of «Silpan-P» cement mixture 39.5~1.0 mm long and 26~1.0 mm in diameter were previously formed in specially made metal molds in an autoclave unit. VLC-500 electronic scales were used to weigh the samples with the molds.

The selection of optimal ratios of PTC 1-100 and the «Ramsinks-2» hydrophobic material in laboratory conditions was 1:0.001, 1:0.002, 1:0.003, 1:0.005, 1:0.008, which ensures the required density of the grouting solution and the rate of strength gain with high operational parameters of the stone.

### Object, subject, and methods of research

The theoretical principles of the research are based on the ability of «Silpan-P» hydrophobic substances from the «Ramsinks-2» group of materials to influence the physical, mechanical and physicochemical properties of existing grouting cement mortars (e.g., PCT 1-100).

**Object of research.** Samples of cement mortars of the «Silpan-P» group, which, when hardened, ensure high-quality contact of cement stone with casing and rocks, and the technology of their use in well casing.

**Subject of research.** The effect of hydrophobic cementing materials of the «Silpan-P» group on the hydration kinetics and technological properties of cement mortars, which significantly affects the quality of cementing production wells.

**Research methods.** The well-known methods of processing and analysing industrial data, methods of planning experiments and statistical methods of processing and analysing the results of experimental studies were used in the work. Experimental studies of the samples were carried out in the laboratory of Poltava Drilling Division of Ukrburgaz.

The hydrophobic effect was determined by laboratory testing for the degree of hydrophobicity of PCT 1-100 cement with the «Ramsinks-2» additive. Samples of cement weighing 200 g were poured with the volume of water required to obtain a normal density of cement dough, left to rest, and the time of water absorption by the cement was noted.

The optimal additive to the «Ramsinks-2» grouting fluid, depending on reservoir thermobaric conditions, is 0.02-0.03% by weight of the binder. Further increase in the additive content leads to a decrease in the strength of the cement stone, which,

in our opinion, is due to the pronounced hydrophobic properties of «Silpan-P».

The data obtained during the test with different values of «Ramsinks-2» as a percentage of cement weight (0.2, 0.25, 0.3 %) are given below in Table 1.

Table 1. Effect of the amount of hydrophobic additive on cement properties

Cement brand and type	Cement sample weight	Name of the additive	Additive content (% by weight of cement)	NGTC normal density of c/dough, ml	Degree of hydrophobicity of cement, min.
PCT1-100	200 g	-	-	95 ml	8
PCT1-100	200 g	«Ramsinks – 2»	0,02	95 ml	11
PCT1-100	200 g	«Ramsinks – 2»	0,025	95 ml	14
PCT1-100	200 g	«Ramsinks – 2»	0,03	95 ml	17

According to the results of laboratory tests of the degree of hydrophobicity of PCT1-100 grouting cement with the «Ramsinks-2» hydrophobic additive, it was found that the degree of hydrophobicity of the cement depends on the amount of «Ramsinks-2» additive in percentage (%) by weight of the cement.

The scheme for selecting formulations with the required parameters and studying the physical and mechanical properties of the grouting stone is standard and is performed at temperatures of 70°C, 100°C, 130°C, 160°C and corresponding pressures by equalising the proportions of PTC 1-100 cement and «Ramsinks-2» hydrophobic material for these conditions. When mixed, a uniform grouting solution is formed. The samples are stored under hydrobarothermal conditions for 1, 7, and 28 days.

The «Ramsinks-2» additive is used directly during cementing operations to prevent reservoir fluid migration (inter- and inter-conveyance flows).

When completing wells, the following reservoir parameters are of the greatest interest: formation (or pore) pressure, fracturing pressure, porosity, geostatic pressure, as they, in turn, allow us to identify such important technological parameters as drilling mud density, permissible speeds of the strings in the open hole, string sizes, well design, etc.

Based on the laboratory studies of the technological parameters of the cement slurry and cement stone, it is recommended to use the «Ramsinks-2M» admixture to the cement slurry with Portland cement for cementing oil and gas wells (for intermediate and production casing) at Ukrburgaz in order to prevent the formation fluids migration (interstitial and formation flows), as well as another direction of implementation, namely, for the purpose of repair and insulation works at Ukrburgaz wells, which in turn will ensure a significant technological and economic effect from the implementation.

Depending on reservoir thermobaric conditions, the optimal additive to the «Ramsinks-2M» grouting fluid is 0.02-0.03% by weight of the binder. Further increase in the additive content

leads to a decrease in the strength of the cement stone, which, in our opinion, is due to the pronounced hydrophobic properties of «Silpan-P».

In our work, we selected grouting fluid formulations based on PCT 1-100 and ST, taking into account the actual temperature, and utilising cements, chemicals, and mud for use on this drill.

In order to exclude the possibility of premature thickening of the grouting solution before it is washed off during the analysis, it is necessary to stop the stirrer of the KC-3 consistometer after 3 hours for 0.5 hours with a sequential continuation of the analysis. The time of the thickening of the plugging solution should correspond to the calculated one plus 1 hour of reserve for the possibility of accelerating the setting and thickening of the solution in contact with bischofite. The required amount of hydrophobic grouting mixture was made by dry mixing PTC 1-100 cement and NTFPA additive to the «Ramsinks-2» hydrophobic material.

«Silpan-P» cement mix is used directly during cementing operations in the well. When mixed, a uniform grouting solution is formed.

Below are the results of laboratory tests on samples of PCT-I-100 cement stone with «Ramsinks-2» hydrophobic admixture.

Conditions for conducting research:

- PCT-I-100 grouting cement;
- W:C=0.50.
- The specific gravity of cement is 1.83.
- Temperature in the autoclave - 75°C.

Study No. 1 (PCT-I-100+0.03% NTFPA + 0.2% «Ramsinks-2»)

Water separation:

- PCT-I-100 + 0.03% NTFC - after 2 hours = 6.8%;
- PCT-I-100 + 0.03% NTFC + 0.2% «Ramsinks-2» = 4.7%.
- The specific gravity of «Ramsinks-2M» is 1.82.
- Thickening time up to 30 UOC = 56 minutes.

Study No. 2 (PCT-I-100+0.06%NTFPA +0.25% «Ramsinks-2»)

Water separation:

- PCT-I-100 + 0.06% NTFC - after 2 hours = 6.8%.
- PCT-I-100 + 0.06% NTFC + 0.25% «Ramsinks-2» = 4.7%.
- The specific gravity of «Ramsinks-2» is 1.82.
- Thickening time up to 30 UOC = 1 h 40 min (during the analysis in the autoclave, the mixing paddle separated)

Study No. 3 (PCT-I-100 + 0.06% NTFC + 0.3% «Ramsinks-2»)

Water separation:

- PCT-I-100 + 0.03% NTFC - after 2 hours = 6.8%.
- PCT-100 + 0.03% NTFPA + 0.2% «Ramsinks-2» = 5,4%.
- The share of «Ramsinks-2» is 1.82.
- Thickening time up to 30 UOC = 40 min.

Study No. 4 (PCT-100 +0.06% NTFPA+0.25% «Ramsinks-2»)

Water separation:

- PCT-I-100 + 0.03% NTFPA - after 2 hours = 6.8%;
- PCT-100 + 0.03% NTFPA + 0.2% «Ramsinks-2» = 4,7%.
- The share of «Ramsinks-2» = 1.82.
- Thickening time to 30 UOC = 2 h 30 min.

Flexural strength of PCT-I-100 + NTFPA according to DSTU B V 2.7.86-99 = 3.5 MPa.

Flexural strength of PCT-I-100 + 0.06% NTFPA + 0.3% «Ramsinks-2» = 9 MPa.

Rheological parameters are an important characteristic of the cementing mud. They largely determine the amount of hydraulic resistance during well cementing, and affect the completeness of the displacement of the mud and the annulus.

The very purpose of the two-part complexes is to maintain the required pressure on fluid-saturated formations during the process of cement hardening. The formation of a coagulation-crystallisation cement structure is accompanied by a decrease in pressure at the wellbore. Therefore, it is necessary to select the grouting slurry column so that the upper part of the column is in a liquid state before the start of hardening and the lower part reaches the required strength. The value of such strength, when the body of the cement ring becomes impermeable to the fluid, reaches about 1.5 MPa.

The technical parameters of the latest hydrophobic grouting solutions (mobility, density, water separation, pumpability, etc.) were confirmed in the laboratory in accordance with the standard requirements of the relevant devices.

The strength value was measured on a PSU-2 hydraulic press. The rheological properties of grouting solutions were studied on a Reotest-2 rotational viscometer. The corrosion resistance of cements in various aggressive environments was studied at temperatures from 20 to 80°C.

In laboratory conditions, research was conducted to determine the absolute gas permeability of cement stone samples with PCT-1-100 and «Ramsinks-2» hydrophobic additive. The analyses were performed in accordance with GOST 26450.0-85 - GOST 26450.2-85.

Table 2. Results of determining the absolute gas permeability of cement stone samples with PCT-1-100 and «Ramsinks-2» hydrophobic

Lab. no. of the sample	Sample formulation	Gas permeability, $a \times 10^{-15} \text{ m}^2$
40443	cement stone from PCT-1-100	0,15
40444	cement stone from PCT-1-100, 0,2% with «Ramsinks-2» additive	
40445	cement stone from PCT-1-100, 0,25% with «Ramsinks-2» additive	0,10
40446	cement stone from PCT-1-100, 0,3% with «Ramsinks-2» additive	0,05
40447	cement stone from PCT-1-100, 0,35% with «Ramsinks-2» additive	0,04
40448	cement stone from PCT-1-100, 0,4% with «Ramsinks-2» additive	0,04

Laboratory studies of the permeability of cement stone samples conducted at the Department of Rock Research and Gas Reserves Estimation of the Ukrainian Research Institute of Natural Gases have shown that the «Ramsinks-2» additive to the cementing mud significantly reduces the permeability of cement stone to gas, which also allows for increased oil and gas well cementation.

Laboratory tests of the grout and cement stone carried out in the laboratory of grouting solutions of the Poltava Grouting Department established that the «Silpan-P» hydrophobic grout

is made of PCT1-100 grouting cement and an admixture of NTFPA and «Ramsinks-2» material:

a) does not significantly reduce the technological parameters of grouting mortar and cement stone, which are determined by the current standards: «Grouting cements. Test methods. DSTU B.V. -2.7-86-99 (GOS 26798.1-96)»;

b) improves the strength characteristics of cement stone, in particular the flexural strength, which increases the durability and manufacturability of the well construction.

The use of «Silpan-P» hydrophobic cement mortars will significantly reduce the migration of reservoir fluids. The use of various types of cements with the «Ramsinks-2» hydrophobic additive will increase the success and efficiency of Ukrburgaz 's operations.

Laboratory analysis of the technological parameters of the cement slurry and cement stone suggests the use of the «Ramsinks-2» additive in Portland cement mixtures for cementing oil and gas wells (intermediate and production casing) at Ukrburgaz. This approach helps prevent the migration of formation fluids, including interstitial and formation flows, and can be utilized for repair and insulation work, delivering notable technological and economic benefits.

The optimal concentration of the «Ramsinks-2» additive in the grouting fluid ranges from 0.02% to 0.03% by weight of the binder, based on the reservoir's thermobaric conditions. Increasing the additive content beyond this range may decrease the strength of the cement stone, likely due to the pronounced hydrophobic properties of «Silpan-P».

The selection of grouting fluid formulations based on PCT 1-100 and ST was carried out considering the actual temperature, using cements, chemicals, and mud specific to the drilling operations. To avoid premature thickening of the grouting solution before it is fully washed off during analysis, the stirrer of the KC-3 consistometer should be stopped for 0.5 hours after 3 hours of operation, with the analysis then continuing sequentially. The thickening time of the plugging solution should match the calculated time plus a 1-hour reserve, allowing for potential acceleration of setting and thickening when in contact with bischofite.

The required amount of hydrophobic grouting mixture was prepared by dry mixing PTC 1-100 cement with the NTFPA additive and the «Ramsinks-2» hydrophobic material.

The technological parameters of the PCT 1-100 cementing slurry combined with the «Ramsinks-2» hydrophobic admixture indicate that the latest hydrophobic solution, «Silpan-P», should be used for cementing oil and gas wells (intermediate and production casing) at Ukrburgaz. This approach effectively prevents the migration of formation fluids (both interstitial and formation flows) and is also suitable for repair and insulation work at Ukrburgaz wells, offering substantial technological and economic benefits.

For our study, we developed grouting fluid formulations using PCT 1-100 and ST, considering the actual temperature and incorporating suitable cements, chemicals, and mud for the drilling process. To avoid premature thickening of the grouting solution during analysis, the stirrer of the KC-3 consistometer was paused after 3 hours for 0.5 hours before resuming analysis. The necessary hydrophobic grouting mixture was prepared by dry mixing PTC 1-100 cement with the NTFPA additive and «Ramsinks-2» hydrophobic material.

In conclusion, it should be noted that the use of «Ramsinks-2» at the stage of well operation is promising for increasing the effective life of depleted fields. For the technological

implementation of such a solution, the equipment that will initially be used for the production and injection of the proposed grouting solutions can be mainly used (Nalyvaiko, 2021).

Previous experimental studies conducted at the laboratory of the Central Ukrainian National Technical University also evaluated the impact of «Ramsinks-2M» on the conditions and kinetics of gas hydrate formation (Klymenko, 2016). It has been found that under certain (static) conditions, «Ramsinks-2M» behaves as a surface active substance that does not dissolve in water, but remains on its surface, thereby forming a «protective film» between water and gas. In this case, there is no contact area between gas and water and no hydrate formation occurs.

However, when oscillating the crystalliser, the onset of the hydrate formation process when using «Ramsinks-2M» began much earlier compared to the experiment in which only distilled water was used. The most significant effect on the acceleration of the hydrate formation process was the concentration of «Ramsinks-2M» of 50 ppm, and at concentrations above 200 ppm, the time of the onset of the hydrate formation process increased significantly.

In other words, under certain conditions, «Ramsinks-2M» can be a promoter of hydrate formation, and under other conditions, an inhibitor, which should be taken into account when using it in hydrocarbon production systems.

In the course of a series of experiments, a clouding of the observation window was also noticed, and after removing the glass, a thin layer of strongly adhered «Ramsinks-2M» microparticles was found on it.

## Results

1. In comparison with the existing solutions, the proposed technical one will allow to obtain «Silpan-P» hydrophobic grouting fluids with lower ranges of grouting fluid density, high stability, good pumpability, and high strength of the hardened stone, and which guarantees the reliability of isolation of productive horizons.

2. The conditions are determined for the use of «Silpan-P» hydrophobic cement mortars of various compositions to reduce the migration of reservoir fluids in various mining and geological conditions.

3. For the specific conditions of cementing production strings of well No. 101 of the Hadiach field, a «Silpan-P»

hydrophobic cement grout from the «Ramsinks-2» group was developed and produced, which provides high quality separation of water and gas bearing formations (Nalyvaiko, 2021).

4. The technology of application of «Silpan-P» hydrophobic cement grout from the «Ramsinks-2» group for delimitation of water and gas bearing formations was developed. These cementing materials were used in deep wells at Ukrburgaz in difficult mining and geological conditions of the DZ, which provided a significant technological, economic and environmental effect (Nalyvaiko, 2021).

## References

- Gleeson J., Paradis K., Sloane B., Melmeth D., Seligman D., (2010). Fiber cement building materials with low density additives, US Patent Office, Patent No 7,658,794, Patented on February 9, 2010.
- Iken, H., Lackner, R., Zimmer, U., (2003). Handbuch der Betonprüfung: Anleitungen u. Beispiele - Hans W. Iken, Roman R. Lackner, Uwe P. Zimmer. 5. Auflage - Düsseldorf: Verlag Bau+Technik, P. 380.
- Klymenko V., (2016). Preliminary assessment of the influence of the additive "Ramsinks-2M" on the formation of gas hydrates - Proceedings of the All-Ukrainian scientific and practical Internet conference Automation and computer-integrated technologies in industry, telecommunications, energy and transport (November 16-17), Kropyvnytskyi; p.100-104.
- Nalyvaiko, O., (2021). Improving the quality of cementing of oil and gas wells with plugging solution with hydrophobic material "Ramsinks-2M"- Proceedings of the 3rd International Scientific and Practical Conference "International Scientific Discussion: Problems, Tasks and Prospects" (October 21-22, 2021). Brighton, Great Britain: A.C.M. Webb Publishing Co Ltd. P. 236 - 248 p.
- Nalyvaiko, O. I., (2005). Method of obtaining a hydrophobic substance based on sedimentary siliceous rocks, Patent of Ukraine 4700, IPC 7E21B43/22, Published 17.01.2005.
- Oreshkin D., (2010). General scheme of obtaining lightweight and ultra-lightweight cement mortars - Construction of oil and gas wells on land and at sea. № 11. - C. 32-33.- Bibliograph. p. 332.

**СЕКЦИЯ**

**ГЕОЛОГИЯ И ПРОУЧВАНЕ НА МИНЕРАЛНИ И  
ЕНЕРГИЙНИ РЕСУРСИ**

**SECTION**

**GEOLOGY AND EXPLORATION OF MINERAL AND  
ENERGY RESOURCES**





# MULTIVARIATE STATISTICAL ANALYSIS OF GEOCHEMICAL DATA FOR THE GOLD MINERALISATION IN THE OBICHNIK ORE DEPOSIT, BULGARIA (PRELIMINARY DATA)

*Rositsa Apostolova, Kalin Ruskov, Stanislav Stoykov, Kamen Popov, Stoyan Klimentov*

*University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: rouskov@mgu.bg, ros\_apos@abv.bg*

**ABSTRACT.** The geochemical characteristics and association of elements in the Obichnik ore deposit, as well as their spatial distribution, have been investigated in this study. The Obichnik deposit is located in the northern part of the Zvezdel-Pcheloyad ore field, which includes hydrothermal Pb-Zn and Au-Pb-Zn mineral occurrences associated with the Zvezdel volcano. The geochemical dataset obtained during the exploration drilling program of the deposit was used to determine the spatial correlation between the chemical elements and their geochemical associations. A total of 40 elements were included for the statistical data processing of more than 13,000 samples from 74 drillholes. A range of statistical processing methods were employed in a systematic sequence. The proposed methodology includes preliminary data preparation, univariate statistical analysis, and Principal component analysis (PCA) as a variety of factor analysis. The groups of elements with the highest loadings in each factor represent the geochemical associations. The associations that include ([Zn, Cd, Pb] S, Au, Cu) from factor 3 and ([As, Sb] Mo, Ag, K) from factor 4 represents the spatial distribution of the main ore zones. These two associations show similar directions of distribution.

**Key words:** Obichnik ore deposit, geochemical associations, multivariate statistical analysis.

## МНОГОМЕРЕН СТАТИСТИЧЕСКИ АНАЛИЗ НА ГЕОХИМИЧНИ ДАННИ ОТ ЗЛАТНАТА МИНЕРАЛИЗАЦИЯ В НАХОДИЩЕ ОБИЧНИК, БЪЛГАРИЯ (ПРЕДДВАРИТЕЛНИ ДАННИ)

*Росица Апостолова, Калин Русков, Станислав Стойков, Камен Попов, Стоян Климентов*  
*Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София*

**РЕЗЮМЕ.** В настоящата работа са изследвани геохимичните особености и асоциациите от химични елементи в находище Обичник, както и пространственото разпространение на тези асоциации. Находището е разположено в северните части на Звездел-Пчелоядското рудно поле, което включва хидротермални Pb-Zn и Au-Pb-Zn находища свързани с Звезделската вулcano-плутонична структура. Изследваната геохимична база данни е получена в резултат на сондажна програма от проучването на находището, като е използвана за определяне на пространствената корелация между химичните елементи и за извеждане на асоциациите от елементи. Общо 40 елемента бяха включени за статистическа обработка на данните от над 13 000 проби от 74 сондажа. Използвани са редица статистически методи за обработка, организирани в систематична последователност. Предложената методология включва предварителна подготовка на данните, едномерен статистически анализ и метод на главните компоненти (PCA), като разновидност на факторен анализ. Групите от елементи с най-високи факторни тегла във всеки фактор представляват геохимичните асоциации. Асоциациите ([Zn, Cd, Pb], S, Au, Cu) от фактор 3 и ([As, Sb] Mo, Ag, K) от фактор 4 представят пространственото разпределение на основните рудни зони. Тези две асоциации показват сходни посоки на разпространение.

**Ключови думи:** находище Обичник, геохимични асоциации, многомерни статистически методи.

## Introduction

Multivariate statistical analysis encompasses a variety of methods, such as cluster analysis and factor analysis, which can identify geochemical features in ore mineralisation, hydrothermal alterations, and characteristics of the host rock within an ore system. This would assist in the interpretation of ore deposit models and supporting exploration programs of these deposits. Principal component analysis is one of the most popular multivariate statistical techniques. Several case studies focus on the statistical analysis of geochemical data and applying factor analysis to map geochemical associations in an individual ore deposit (Popov 2002, 2016, Marinov et al. 2019, Klimentov et al. 2024).

The Obichnik ore deposit is situated in the northern part of the Zvezdel-Pcheloyad ore field which includes hydrothermal lead-zinc and gold-lead-zinc mineral occurrences associated with the Oligocene Zvezdel volcano-plutonic complex (Georgiev, 2012; Popov & Popov, 2022). The deposit is situated immediately to the north of the village of Obichnik and to the east of the village of Drumche. The Obichnik gold mineralisation is associated mainly with pyrite, sphalerite, galena, chalcopyrite, tennantite-tetrahedrite, and enargite, with gold variably distributed within these sulphides and quartz,

sericite, kaolinite, illite/smectite, and adularia (Petrova and Stanchev, 1994).

The ore bodies come in two types - isometric (unclearly tubular) and sub-horizontal stratiform, according to their deposition format and conditions. The ore-forming process in the Obichnik area is in two-stages: gold-bearing quartz-sulphide and carbonate (Dragiev et al., 2010).

## Geological settings

The Obichnik deposits is located in the South of Bulgaria (Fig. 1). It is situated in the Morava-Rhodope zone and its East Rhodope tectonic unit, according to the tectonic scheme of Dabovski et al. (2002). It is part of the Alpine-Himalayan belt. During the Late Cretaceous-Eocene times, it experienced subduction-collision events (Marchev et al., 2007). Late Cretaceous-Palaeocene magmatism is represented exclusively by plutons composed of amphibole-biotite granodiorite and biotite- and two-mica granites. In contrast, Late Eocene-Oligocene magmatism is represented by volcano-plutonic suites and intrusives with largely variable in K and Si. Epithermal deposits are associated with the magmatic rocks.

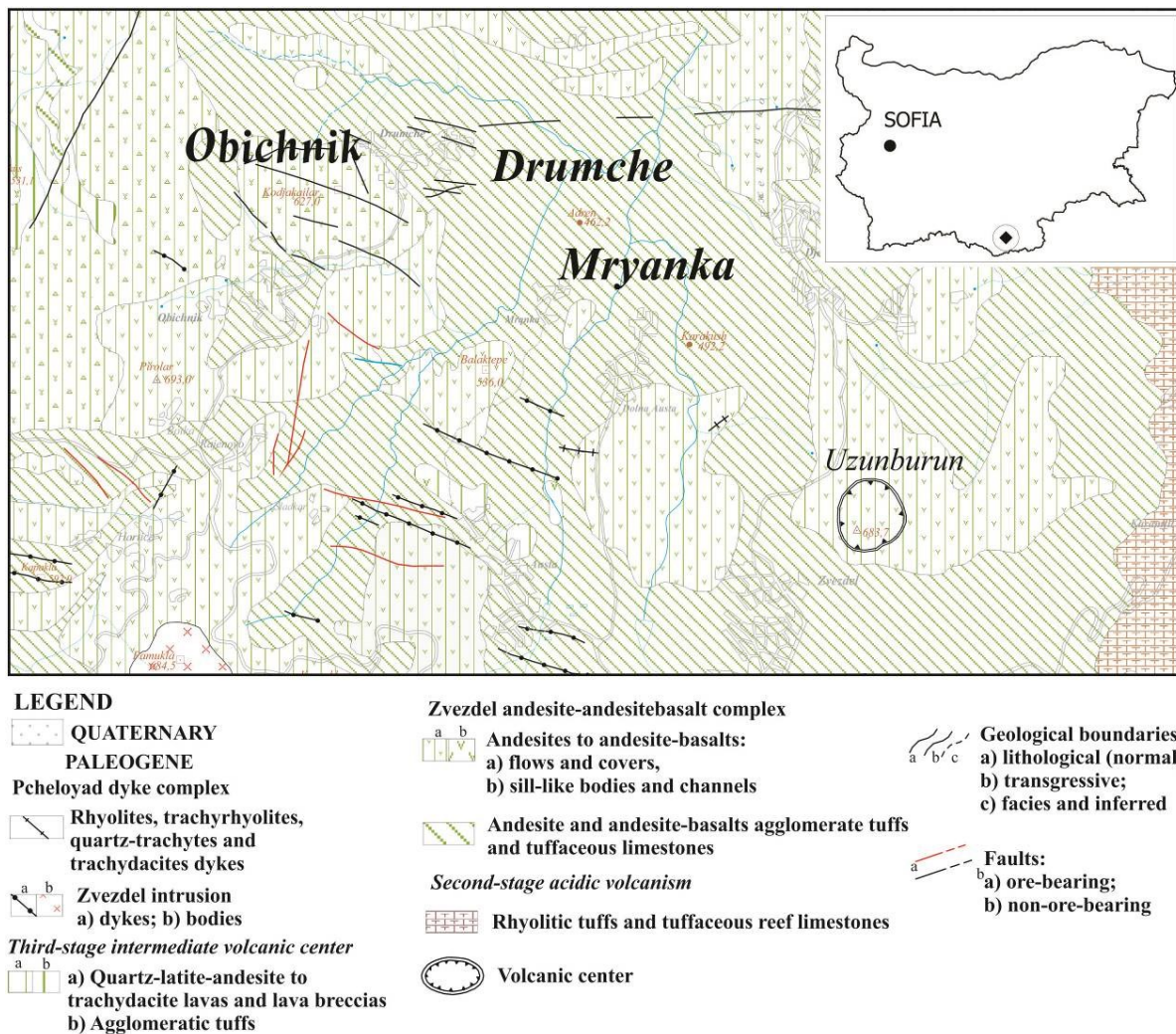


Fig. 1. Geological map in scale 1: 50 000 (after Cekova, V., 1965, Dragiev et al., 2010)

The most important Intermediate Sulphidation epithermal deposits (Chala, Madjarovo, and Zvezdel-Pcheloyad) are hosted in the shoshonitic and high K-Ca alkaline magmatic rocks of the Borovitsa, Madjarovo, and Zvezdel paleovolcanoes (Marchev et al., 2007). Occasional occurrences of Cu-Mo porphyry mineralisation have been identified in close spatial proximity. Intermediate rocks predominate in all three volcanic areas, with felsic varieties being voluminous in Borovitsa and subordinate in Madjarovo and Zvezdel.

The primary rocks comprising the Obichnik area are volcanics with andesitic composition, along with their pyroclastics, such as diverse breccia and tuffs, as well as diorite dykes (Fig. 1). Metasomatic and supergene alterations are observed in the area.

The Obichnik deposit can be considered as epithermal adularia-sericite type Au mineralisation with quartz-sulphidic gold-bearing and carbonate phases in the hypogenic stage (Kunov, Mandova, 1997). The mineralisation occurs within quartz-sericite-pyrite altered epiclastic breccias within an east-west trending zone of hydrothermal alteration (Abbott, 2021).

Ore mineralisation is associated with several types of alteration. The following are distinguished: propylitic, argillic (locally occurring), and quartz-adularia-sericite, which is the most distinct and to which the gold mineralisation is associated.

## Materials and methods

The data obtained during the exploration drilling program of the deposit were used to determine the spatial correlation between the chemical elements and their geochemical associations. A total of 13 462 core samples from 74 drill holes were analysed to study the primary geochemical haloes of the Obichnik deposit area. The chemical content of the drilling samples was determined for gold by fire assay and by Inductively Coupled Mass Spectrometry (ICPMS) analysis for 40 chemical elements.

A total of 29 elements were included for the preliminary statistical data processing (Au, Ag, Pb, Zn, Al, As, Ba, Be, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, K, La, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, P, S, Sb, Sc, Sr, Ti, V). Those of the analysed elements which are not typical of the ore-forming processes, or their contents are below the detection limit of the analysis or have constant values, are excluded from further statistical processing.

A range of statistical processing methods were employed in a systematic sequence (Popov 2002, 2016, Marinov et al. 2019, Klimentov et al. 2023) in this study. The methodology used for assessing the spatial correlation of elements and creating 3D models of factor loadings includes preliminary data preparation, univariate statistical analysis, as well as correlation and regression analyses. This part of the methodology enables the identification and rectification of

errors in the data. The next step encompasses multivariate statistical techniques such as cluster and factor analysis. Sophisticated 3D modelling techniques were applied to visualise the resulting geochemical associations. Principal component analysis (PCA), as a variety of factor analysis, represents a statistical procedure that allows the information content in a large dataset to be summarised by means of a smaller set of factors, which can be more easily visualised and analysed.

Principal component analysis with varimax rotation was executed to calculate the factors. The statistical processing was conducted using the *Jamovi* software, ensuring robust

analysis. Subsequently, the outcomes underwent further refinement using the *Leapfrog* 3D modelling software. This involved employing the Radial Basis Function (RBF) as an interpolant to effectively visualise the spatial distribution of the identified geochemical associations.

The Cluster analysis method represents another data exploration tool for dividing a multivariate dataset into “natural” clusters (groups). Hierarchical approach is used and the distance between two clusters is defined to be the average distance between data points in the first cluster and data points in the second cluster.

Table 1. Results of Principal Component Analysis (PCA). Only the factor loadings larger than  $\pm 0.3$  are shown.  
Component Loadings

	Component							Uniqueness
	1	2	3	4	5	6	7	
Fe	<b>0.82</b>							0.266
Co	<b>0.78</b>							0.342
Mn	<b>0.779</b>							0.289
Sc	0.655				0.538			0.223
P	0.446						0.445	0.53
Ca		<b>0.834</b>						0.257
Sr		<b>0.734</b>						0.386
Mg		<b>0.726</b>						0.273
Be		0.672						0.41
Zn			<b>0.884</b>					0.186
Cd			<b>0.845</b>					0.271
Pb			<b>0.810</b>					0.313
Au			0.501					0.688
Cu			0.485					0.609
S			0.398					0.576
As				<b>0.813</b>				0.315
Sb				<b>0.79</b>				0.342
Mo				0.654				0.521
Ag				0.392				0.815
K		0.304		0.352				0.647
Ti					0.622			0.596
V	0.614				0.621			0.159
Al		0.473			0.618			0.344
Na		0.39			0.593			0.437
Cr						<b>0.832</b>		0.242
Ni	0.374					<b>0.722</b>		0.266
La						-0.308		0.654
Ba							0.626	0.55
Hg							-0.336	0.796

Note. 'Varimax' rotation was used

## Results and discussion

The results of the factor analysis using principal component analysis for 29 elements are shown in Table 1, where the total variation is decomposed on 7 factor axes.

The goal of PCA analysis is to extract the important information from the data and to express this information as a set of summary indices called factors. Varimax rotation procedure is used for additional adjustments of the factor axes. The purpose of this rotation is taking the factor pattern plot and rotating the axes in such a way that the points fall close to the axes. The groups of elements with the highest loadings in each

factor represent the geochemical associations. Thus, the obtained geochemical associations of elements with similar spatial distribution presented by each factor are as follows:

- Factor 1: ([Fe, Co, Mn] Sc, P, V, Ni)
- Factor 2: ([Ca, Sr, Mg] Be, K, Al, Na)
- Factor 3: ([Zn, Cd, Pb] S, Au, Cu)
- Factor 4: ([As, Sb] Mo, Ag, K)
- Factor 5: (Sc, Ti, V, Al, Na)
- Factor 6: ([Cr, Ni] -La)
- Factor 7: ((P, Ba)-Hg)

The results of the hierarchical cluster analysis are shown in Figure 2. The distinct groups are similar to those of the factor analysis, with elements from factors 6 and 7 exhibiting weaker correlations and being attached to other groups.

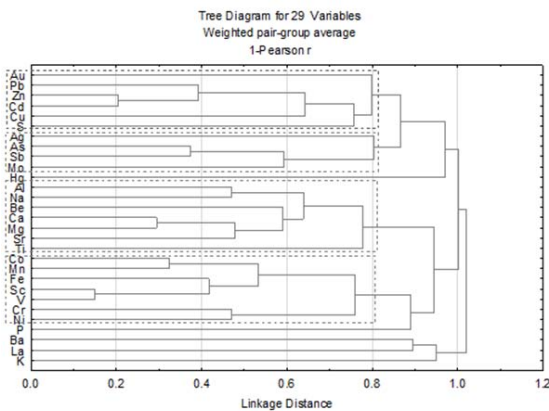


Fig. 2. Hierarchical cluster dendrogram

Based on the factor analysis, the scores for each sample in the given factor can be calculated (Popov, 2002, 2016). This approach allows to perform further 3D modelling or to plot PCA loadings of the first two principal components comparing geochemical associations considering that the factor scores represent the spatial relationship between elements (Fig. 3).

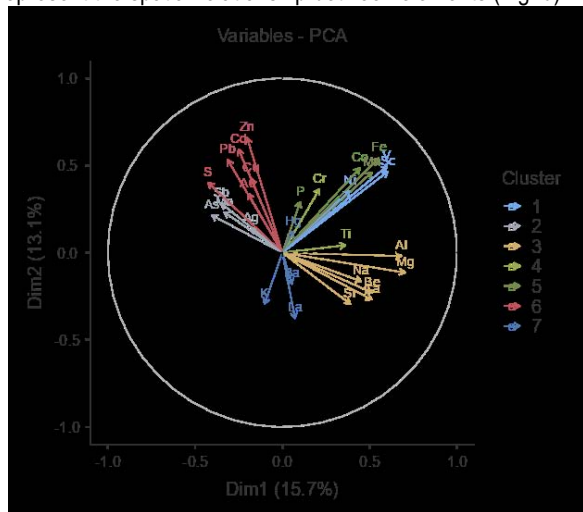


Fig. 3. PCA loading plot of the first two principal components comparing geochemical associations

The first factor represents the association of Fe, Co and Mn, as well as Sc, P, V and Ni but with lower loadings (less than 0.7). The elements comprising this factor may be associated with the carbonate stage of mineral formation, which involves various iron and manganese minerals (Dragiev et al., 2010).

The second factor considers the behavior of the group of elements with the core of Ca, Sr and Mg which have a high correlation with each other. The elements Be, K, Al, and Na also join this group but with lower weights.

The third factor represents the distribution of the main ore elements in the Obichnik deposit, which are joined in an association of Zn, Cd and Pb, as well as S, Au and Cu with lower loadings. The spatial distribution of this factor overlaps the main ore zone and probably follows the Quartz-sulphide stage of mineral formation (Dragiev et al., 2010). This is supported by the microscopic observations made so far, where gold is found in close association with galena, pyrite, sphalerite, and chalcopyrite (Fig. 4).

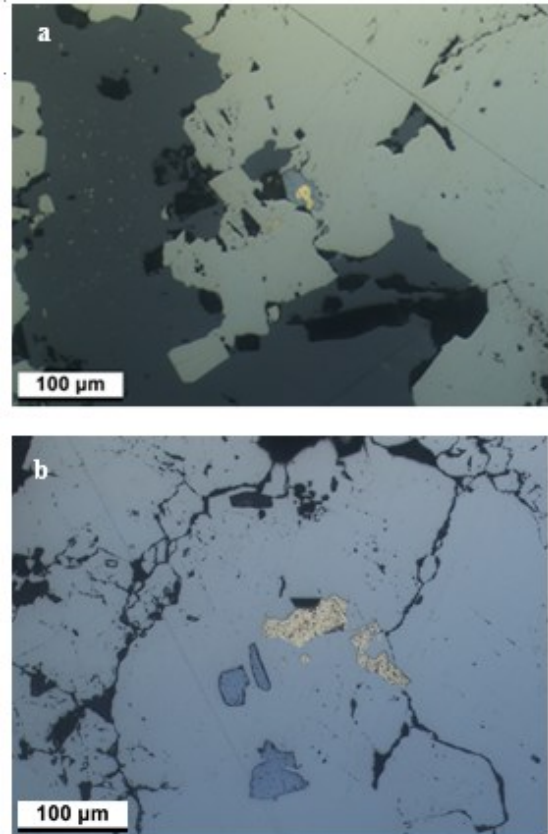


Fig. 4. Photomicrograph in reflected light, parallel Nickols. (a) Gold grain (bright yellow) located in galena and three smaller Au grains among pyrite. (b) Gold grains included in pyrite. To the left of them galena crystals (light grey).

The fourth factor represents the association of As and Sb which show high correlation with each other and elements Mo, Ag and K joined with lower weights. This factor can also be associated with the quartz-sulphide stage and the spread of tennantite-tetrahedrite. Additional mineralogical studies are needed to explain this connection.

The fifth factor groups Sc, Ti, V, Al and Na and shows some weak relation to them with no factor loading more than 0.7.

The sixth factor describes the association between Cr and Ni and negative correlation with La.

The seventh factor shows a weak correlation between P and Ba and some negative correlation with Hg.

Figure 3 displays the score plot of the first two principal components. These scores are called Dim1 and Dim2. The



score plot is a map of 29 elements. The chemical elements close to each other have similar spatial distribution profiles, whereas those far from each other are dissimilar. From the figure, it can be seen that the elements involved in factors 3 ([Zn, Cd, Pb] S, Au, Cu) and factor 4 ([As, Sb] Mo, Ag, K) exhibit similar spatial behaviour. Other two factors with similar behaviour are factor 1 ([Fe, Co, Mn] Sc, P, V, Ni) and factor 6 ([Cr, Ni] -La). Also, it can be noticed that the elements participating in factor 2 ([Ca, Sr, Mg] Be, K, Al, Na) have an opposite direction of propagation compared to those participating in factors 3 and 4.

Incorporating mineralogical data can be crucial for further understanding of the geochemical associations. Observation of the polished preparations with a microscope identified the most common ore minerals and their relationships. Pyrite was the most abundant, followed by sphalerite, galena, and chalcopyrite. In addition, hematite, which is both primary and the result of secondary alteration of primary ore minerals, is observed in nearly all specimens. Specific areas have been targeted for investigation by X-ray spectral microanalysis to resolve the chemistry and type of minerals. Detailed microscopic studies and sample descriptions will be the subject of a separate article.

## Conclusion

The results of the multivariate statistical analysis of geochemical data in the Obichnik ore deposit and graphical plots of the factor scores allow to map the geochemical associations of these elements characterised by a certain similarity. The association of ([Zn, Cd, Pb] S, Au, Cu) from factor 3 and ([As, Sb] Mo, Ag, K) from factor 4 represents the spatial distribution of the main ore occurrences.

The results in this study show that geochemical clusters, defining primary lithology, alteration, and ore assemblage that share comparable geochemistry, can be discriminated by different statistical methods, like the joining or tree clustering method, and factor analysis, like PCA. The observed good correlation between the results from these two methods is proof of the robustness of the approach.

**Acknowledgements.** The authors express their gratitude to Seequent Limited for providing them with an academic license of Leapfrog Geo software and to Gorubso Kardzhali JSC and Velocity Minerals Ltd for providing the database. The analyses were partially financed by scientific research project #GPF-251 of the University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”.

## References

- Abbott J. (2021). NI 43-101 Technical Report Exploration and Mineral Resource Estimation for the Obichnik Property, Republic of Bulgaria. Obichnik Technical Report. <https://velocityminerals.com/site/assets/files/6545/2021-12-08-obichnik-technical-report.pdf>
- Cekova D. (1965). Report of the geological mapping of the Zvezdel-Galenit-Pcheloyad project in 1962-1964. M 1:5000. Geofund, Ministry of environment and water (in Bulgarian).
- Dabovski, C., Boyanov, I., Khrichev, K., Nikolov, T., Sapounov, I., Yanev, Y. & Zagorchev, I. (2002). Structure and Alpine evolution of Bulgaria. *Geologica Balcanica* 32, 9-15.
- Dragiev, H., Dragieva, B. (2010). “The Zvezdel-Pcheloyad ore region”. The Momchilgrad and Asara prospect area – Geological report of gold-silver ore with calculation reserves and resources as of 01.12.2010 on the Obichnik, Rudarka and Plovka area. Gorubso Kardjali.
- Georgiev, V. (2012). Metallogeny of the Eastern Rhodope. – Prof. Marin Drinov Academic Publishing House.
- Klimentov, S., Ruskov, K., Popov, K., Marinov, I., (2023). Geochemical associations in the Sedefche ore deposit, Bulgaria. Annual of the University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, Vol. 66.
- Kunov, A., Mandova, E. (1997). Supergene minerals from Au-Ag deposit Obichnik (Eastern Rhodopes). – *Rev. Bulg. Geol. Soc.*, 58, 1, 19-24.
- Marchev, P. (2007). Magmatic influence on the zonation of the Paleogene epithermal mineralization in the Central-Eastern Rhodopes, Bulgaria and Greece. *Proceedings 9-th Biennial SGA Meeting*. p. 857-860.
- Marinov, I., Popov, K., Ruskov, K., Nikolova, D. (2019). Factor analysis of the geochemical associations in Milin Kamak ore deposit, Bulgaria. – *Rev. Bulg. Geol. Soc.*, 80, 3, 142-144.
- Petrova, K., and Stanchev, C. (1994). Mineralogy of the adularia-sericite type epithermal mineral occurrence Obichnik (East Rhodopes, Bulgaria) – *C.R. Acad. Bulg. Sci.*, 47.
- Popov, K. (2002). Geochemical association in Radka ore district. – *Ann. Univ. Mining and Geol.*, 45, 1–Geol. and geophys., 57–63.
- Popov, K. (2016). 3D Modelling of the geochemical associations in the Assarel porphyry-copper deposit (Bulgaria). – *C. R. Acad. Bulg. Sci.*, 69, 9, 1175–1182.
- Popov, P., K. Popov. (2022). Metallogeny of Bulgaria. Publ. BMGK Commerce EOOD, Sofia, ISBN 978-619-92104-0-6, pp. 426 (in Bulgarian with extended English summary).

# STRENGTHENING OF A DEEP EXCAVATION UNDER COMPLEX ENGINEERING AND GEOLOGICAL CONDITIONS

*Ina Bozhinova-Popova, Emanuela Malinkova*

*University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: ina\_popova@abv.bg; emanuela.malinkova@mgu.bg*

**SUMMARY.** The article presents a solution for the reinforcement of a 12.5-metre-deep excavation with high groundwater level located in a densely built-up area, with facilities like a nearby Sofia Metropolitan tunnel, a sewage collecting tunnel, as well as the Perlovka River. The reinforcement is 60 cm thick and includes slurry walls with joint pipes between the wall sections. The anchors are of limited length due to the closely located structures. The groundwater drawing was carried out with five pumps from deep pumping wells. After the reinforcement construction was completed, the excavation works were successfully executed.

**Keywords:** lowering ground water level, weak soils, small diameter vertical drains, ground water, pile foundation.

## УКРЕПВАНЕ НА ДЪЛБОК ИЗКОП ПРИ СЛОЖНИ ИНЖЕНЕРНОГЕОЛОЖКИ УСЛОВИЯ

*Ина Божинова-Попова, Емануела Малинкова*

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

**Резюме.** В статията е дадено решение за изпълнение на изкоп с дълбочина 12,5 m при високи нива на почвените води и при околنو пространство, наситено със сгради и съоръжения, между които близко разположен тунел от Софийското метро, канализационен тунел и Перловската река. Укрепването е с шлицови стени с дебелина 60 cm и фугови тръби между отделните кампади. Анкерите са сравнително къси, тъй като тяхната дължина е ограничена от околните близко разположени съоръжения. Водопонижението е извършено чрез 5 помпи, които са разположени в дренажни кладенци с голяма дълбочина. Изпълнението е завършено успешно и обектът е изграден над котата на терена без никакви проблеми.

**Ключови думи:** водопонижение, слаби почви, вертикални дренажи с малък диаметър, почвени води, пилотно фундиране.

## Въведение

Един от най-важните проблеми в Столицата са местата за паркиране. По тази причина, при много от съвременните сгради, особено тези с по-голяма височина, се изпълняват подземни етажи за паркинги. Поради наличното гъсто застрояване и съществуващата инженерна инфраструктура, изпълнението на дълбоки изкопи за нуждите на паркирането е трудно и отговорно.

Обектът, който се разглежда в статията, е особено сложен, тъй като съчетава дълбок изкоп в терен с високо ниво и голям приток на подпочвените води, както и силно ограничено пространство, в което да се изпълняват анкерите: от една страна – Перловската река с мостова конструкция, от другата страна – близо разположен тунел на Софийското метро и прилежащата канализационна тръба с голямо сечение. Въпреки тези трудности, изкопът е укрепен, отводнен и изпълнен без проблеми.

Теренът, в който се проектира укрепване и отводняване на строителен изкоп, се намира в централната част на гр. София, м. „Подуене-Център“, район Оборище. Имотът се намира от източната страна на Парк “Заимов”. От северната страна имотът граничи с бул. “Ген. Данаил Николаев”. По югоизточната страна, имотът граничи с корекцията на коритото на р. Перловска. Теренът е равнинен с надморска височина, варираща от кота 529 до 531 метра.

## Инженерногеоложки и хидрогеоложки проучвания

За нуждите и целите на настоящото проектиране са използвани геодезични, конструктивни и архитектурни данни за подземната част на сградата, както и данни за

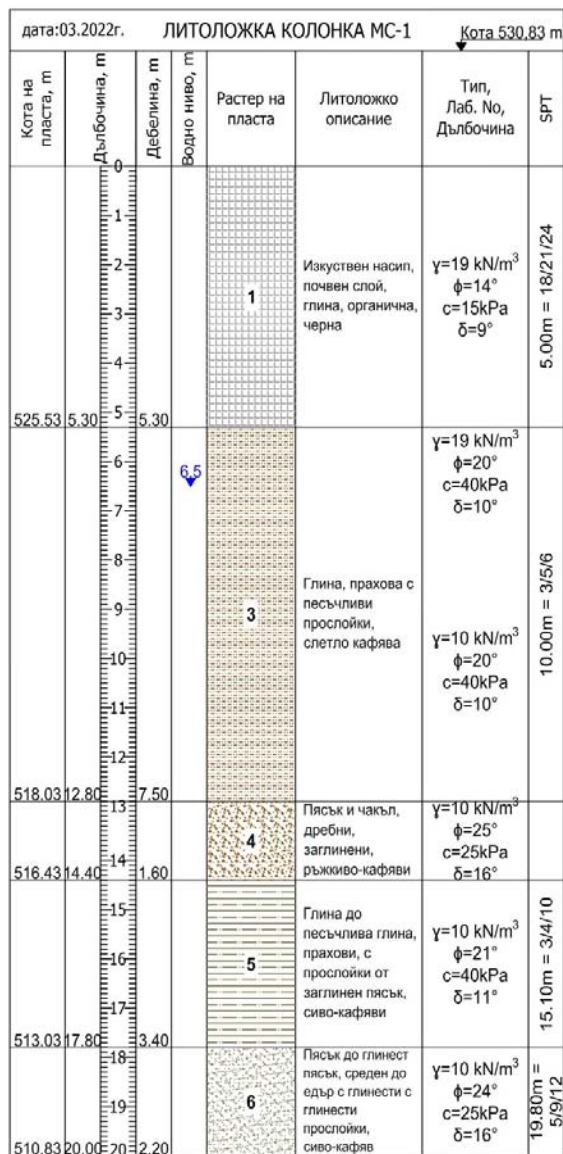
преминаващ в близост съществуващ метро тунел, данни за коритото на р. Перловска и кадастрални данни за подземните комуникации по периферията на обекта. За уточняване на инженерногеоложките и хидрогеоложките условия са изпълнени 4 броя сондажни изработки, чиито дълбочини са до 20 m под кота терен.



**Фиг.1. Ситуация с разположение на проучвателните сондажни изработки**

Сондажите са разположени по периметъра на строителната площадка. Отчетено е водното ниво под кота терен, във всички изработки. Взети са ненарушени проби от почвените разновидности. Изпълнени са допълнителни проучвания „in situ“, по метода SPT. Използван е програмен продукт, чрез който от SPT изпитванията са уточнени характеристиките на почвите, които са съобразени и с данни от мащабните проучвания на характерните почвени разновидности, получени и обработени във връзка със строителството на Софийския метрополитен. Данните обхващат всички почвени разновидности, в това число и

насипите, които на определени места имат дебелини до 3 m. Определянето на характеристиките на насипите се налага поради факта, че те са негодни за фундиране, но създават земен натиск. С получените по-горе стойности на якостните характеристики на почвите се изчислява укрепителната конструкция на вертикалните откоси на изкопа за строителство на сградата. Видът и данните за физикомеханичните показатели на почвените разновидности са дадени в сондажната колонка на Фиг. 2



Фиг. 2. Сондажна колонка

Околното пространство е изследвано и по данни от подземния кадастър на Столична община, огледи на място, данни за минаващото в близост трасе на метротунела:

- откъм ул. „Проф. Милко Бичев“ – наличие на метротунел и подземен колектор.
- откъм бул. „Ген. Данаил Николаев“ – означен е канализационен канал и ел. трасе;
- откъм бул. „Евлоги и Христо Георгиеви“ - р. Перловска в стоманобетонно корито, покрито с плоча.

## Земен натиск и статически изследвания

Земният натиск върху укрепителната конструкция е определен по програма, разработена в МГУ за нуждите на Софийския метрополитен и е използвана за тази цел дълги години без проблеми. В нея се отчита съдействието на триенето почва-укрепителна стена, което обикновено намалява земния натиск до 20 %. Дълбочината на фундиране е на 12,9 m под нивото на естествения терен. Тъй като има високи нива на почвените води, а някъде има и почви, които могат да се размекнат при действието на водите и преминаването на тежки машини, се предвижда 40 cm баластрова възглавница.

С тази възглавница ще се осъществи и денирането на повърхностни води, чрез вкопаване на дренажни канавки, ако се наложи тяхното изпълнение.

Като се вземе предвид и дебелината на баластровата възглавница, дълбочината на изкопите става 13,30 m, мерено от кота терен. Максималната изчислителна дълбочина на строителния изкоп с включена водопонизителна система (площен дренаж), мерено от горен ръб укрепителна ограда е приета на 13 m. Поради архитектурни и конструктивни съображения шлицовата стена е на по-ниска кота от нивото на естествения терен и затова е приета посочената изчислителна дълбочина.

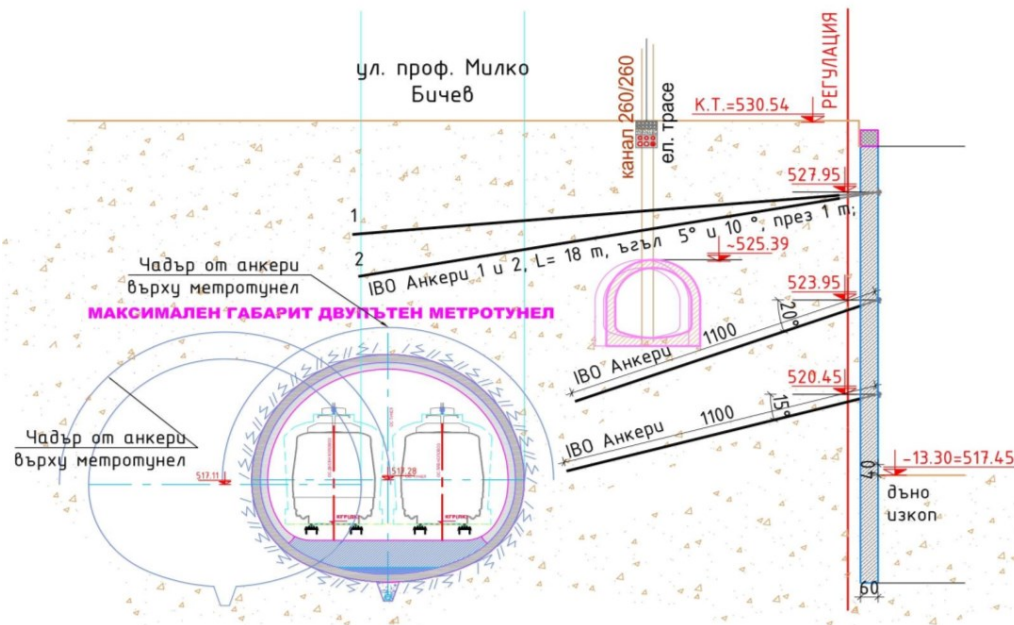
Поради по-голямата дълбочина на строителната яма, се приема подпиране на три нива с пасивни анкери тип ИВО. Съществуващите близко разположени съоръжения, дефинират местата и дължините на използваните анкери. Съобразяването с особеностите на околното пространство, позволява изпълнението на анкерно укрепване, без да се нарушават функциите и стабилитетите на прилежащите съоръжения.

Изчисленията за укрепителните стени са направени, като са отчетени коравините на стените, пружинните константи на анкерите и коефициентите на Винклер за околната почва. Съблюдувано е условието земната реакция върху забитата част да е по-малка от пасивното съпротивление на почвите. При тази постановка, земният натиск до дълбочината на изкопа се приема като равномерно разпределен, съгласно постановката на Шнебели (Schnebeli 1972). Към него пропорционално се добавя водният натиск в дълбочина от котата на водното ниво. На практика, нивото на подземните води в процеса на изкопаване и отводняване на строителния изкоп се понижава, поради сработването на водните нива вън и вътре в изкопа. Отводняването на изкопа се изпълнява от вътрешната страна на шлицовите стени.

Укрепителните стени и анкерите са оразмерени за максимален огъващ момент. Необходимата дълбочина на забиване на укрепителната конструкция с оглед на статиката е 4 m под кота дъно изкоп.

Като се отчете определеното натоварване, се приемат анкери през осови хоризонтални разстояния от 1 m с определена дължина съгласно фигура 3.

Изчислителната схема е по силово-деформационния метод, (Божинов, Попов 2016). Съгласно последни разработки за земния натиск с отчитане и на влиянието на кохезията в основната схема, наклоните на плъзгателните повърхнини се увеличават вследствие на кохезията /пълно доказателство с подобрене на основната теория на Кулон/ е изложено в книгата на проф. Б. Божинов (Божинов 2022)/.



Фиг. 3. Схема на укрепване с шлицова стена и IBO анкери на три нива до Метро тунел и канализационен тунел.

Съгласно направените изводи, наклонът на плъзгателната повърхнина с отчитане действието на кохезията, се определя като корен на уравнението (Божинов 2022):

$$\gamma H [\sin \alpha \cdot \cos \alpha - \sin(\alpha - \varphi) \cdot \cos(\alpha - \varphi)] + 2c \cdot \cos^2(\alpha - \varphi) = 0 \quad (1)$$

където: “ $\gamma$ ” е средното обемно тегло на почвата, “ $H$ ” е дълбочината на изкопа, “ $\alpha$ ” е наклонът на плъзгателната повърхнина спрямо хоризонта, “ $c$ ” е кохезията и “ $\varphi$ ” е ъгълът на вътрешно триене на почвата.

Съгласно тези изводи, при дълбочина на изкопа  $H = 13$  m, обемно тегло на почвата  $20 \text{ kN/m}^3$ , ъгъл на вътрешно триене  $20^\circ$  и кохезия  $30 \text{ kPa}$ , наклонът на плъзгателната повърхнина става:

$$20 \times 13 [\sin \alpha \cdot \cos \alpha - \sin(\alpha - 20) \cos(\alpha - 20)] + 2 \times 30 \cos^2(\alpha - 20) = 0 \quad (2)$$

Решението на горното уравнение дава ъгъл на наклона спрямо хоризонталата  $\alpha = 65^\circ$ , докато по теорията на Кулон, този ъгъл е  $55^\circ$ . Това означава, че клинът, който се получава при плъзгане вследствие на земен натиск, става по-стръмен и неговият катет на повърхността на терена вместо 9,10 m, става 7,5 m. Това позволява използването на по-къси анкери. Именно тази постановка е направила възможно използването на по-късите анкери, съобразени с ограниченото околно пространство на обекта.

За укрепителна конструкция на строителния изкоп е прието да бъде анкерирана шлицова стена с дебелина 60 cm. За да се гарантира водоплътност на стените и липса на отклонения на отделните кампади при изпълнението им, връзката между стените е с фугови полутръби.

### Отводняване на строителен изкоп

За определяне на представителна стойност на коефициента на филтрация и параметри на депресионната линия, са направени допълнителни сондажи и опитни

водочерпения. При преглед на видовете почви и техните дебелини и дълбочини на залягане се установява, че водоплътни пластове до дълбочината на фундаране няма. Редуват се глинни с пясъчни прослойки, пясъци и чакъли, както и насипи. Може да се очаква, че почвените води ще се подхранват главно през силно пропускливите пясъци и чакъли, но ще проникват и през останалите почвени разновидности, като пласт 3 – глина, прахова с пясъчни прослойки, пласт 5 – също глина с прослойки от заглинен пясък и дори през насипите, които не са уплътнени и имат значителна водопроводимост.

За ориентацията относно водните количества, които следва да се изпомпват, може да се приеме средна дълбочина на водните нива 4 m под котата на естественият терен. Като се приеме дълбочина на изкопа 13 m, остават за водопонижение до дъното на изкопа около  $s=9$  m. При обем на порите  $n=0,5$ , и площ за отводняване  $A=8000 \text{ m}^2$ , при пълно водонасищане на почвата, се получава акумулирано водно количество:

$$Q_w = s \cdot n \cdot A = 9,0 \cdot 0,5 \cdot 8000 = 36\,000 \text{ m}^3 \quad (3)$$

От този обем следва да се изпомпват около 50 %, тъй като няма да се достигне пълно осушаване на почвите. Поради очаквано допълнително подхранване на водите, и тъй като водопонижението трябва да бъде най-малко на 50 cm под котата на дъното, се очакват водни количества от порядъка до  $30000 \text{ m}^3$  вода за изпомпване. Водопонизителните кладенци ще се изпълняват от нивото на терена по време на изпълнение на шлицовите стени. А водочерпеното ще започне след като шлицовите стени са вече изпълнени.

### Изходни данни и изчисления

Почвите в петното на сградата са преобладаващо пропускливи в по-голяма или по-малка степен. Това дава известно основание, да ги третираме като еднопластова среда. В дълбочина залягат пластове от долния плиоцен.



Те могат да се приемат като водоплътни. По тази причина, при отводняването се приема схемата: безнапорен хоризонт с дълбочина на водоупора 17 m. Средната стойност на определения представителен коефициент на филтрация на почвите, съгласно данни от допълнителните пробни водочерпвания, е приблизително  $4,5 \cdot 10^{-5}$  m/sec. Радиусът на влияние при водопониженето, определен по формулата на Зихард (Grundbau 1966 и Гълъбов, Стоянов 2005) и при водопонижение от 4 m при взаимодействие с външна среда е:

$$R = 3000 \cdot s \sqrt{k} = 3000 \cdot 4 \sqrt{4,5 \cdot 10^{-5}} = 80m \quad (4)$$

Дълбочината на водопонижението се приема въз основа на обстоятелството, че изкопът е ограден от водоплътни стени, които не позволяват филтрация през тях.

### Изчисления

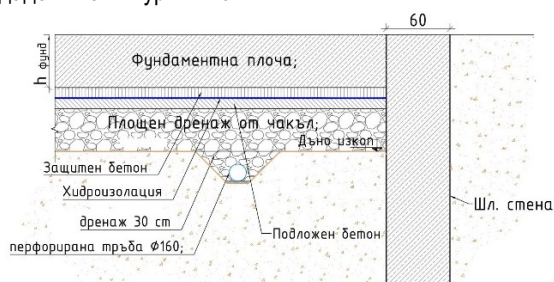
Площта за отводняване е приблизително 8000 m<sup>2</sup>. Периметърът е около 400 m. Отнесено към кръгъл кладенец, това прави радиус на кладенеца:

$$r = \sqrt{\frac{8000}{\pi}} = 50m \quad (5)$$

Водопритокът може да се определи по формулата на Форхаймер (Гълъбов, Стоянов 2005):

$$Q = \frac{1,37 \cdot k (h_1^2 - h_2^2)}{\frac{lgR}{r}} = 16,6 \text{ l/sek} \quad (6)$$

Ако се монтират помпи с дебит по 3,5 l/s, това прави приблизително 5 помпи, които ще обезпечат количеството от 16,6 l/sek. Схема на площен дренаж и разрез на водопонизителен кладенец с помпено оборудване са дадени на Фигури 4 и 5.

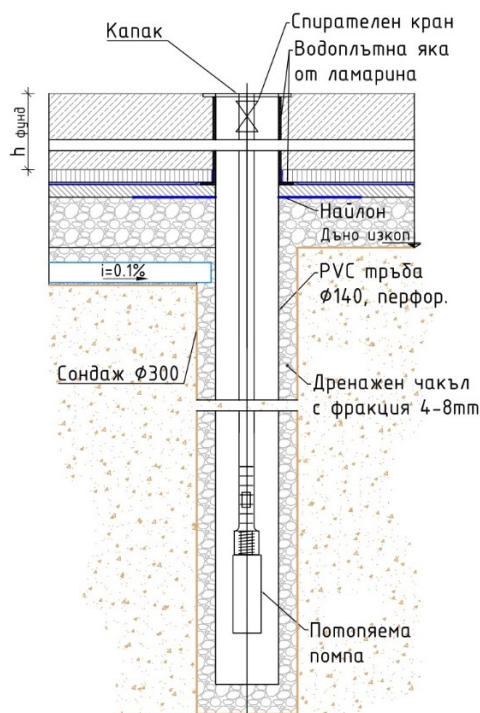


Фиг. 4. Схема на площен дренаж с дренажна тръба под фундаментната плоча

### Мониторинг за стабилност на конструкцията и напрегнатото състояние на анкерите

Контролът се състои в измерване на усилията в анкерите чрез динамометри, пробно натоварване на инжекционните анкери и наблюдение на преместванията чрез репери. Данните от измерванията ще дадат основание да се провери действителния коефициент на сигурност на конструкцията чрез сравнение с проектните данни. Съгласно ЕВРОКОД 7 се предвижда задължително изпитване на вече изпълнени инжекционни анкери (пробно натоварване) за удостоверяване на годността им.

Получените от измерванията резултати са изключително важен показател за оценка на ефективността на изградените укрепителни съоръжения и сигурността на околното пространство.



Фиг. 5. Схема на водопонизителен кладенец с помпено оборудване

### Заклучение

От изпълненото укрепяване и отводняване се установи, че на практика укрепителни стени със сравнително малка дебелина и подпрени само на три нива, могат да се прилагат в подобни тежки инженерногеоложки и хидрогеоложки условия. Измерванията на преместванията на шлицовите стени показаха нищожни резултати – само няколко милиметра. Пасивните анкери останаха ненапрегнати, което показва, че те изменят напрегнатото състояние на почвения масив около подпорните стени, а не са само опорни конструкции на стените. Потвърди се и предпоставките за изменение на ъгъла на плъзгателната повърхнина и съответното намаление на активния земен натиск. Натрупаният опит може да се използва и при други подобни случаи.

### Литература

- Абрамов, С. (1955). *Хидрогеологические расчеты вертикальных дренажей при осушении угольных месторождений*. Москва
- Божинов, Б. (2022). *Геотехнически обект*, Авангард Прима, София.
- Божинов, Б., Дингозов, Г. (1979). *Пилотно фундиране*, София.



Божинов, Б., Попов, С. (2016). *Изчисляване на пилоти, шлицови и шпунтови стени, натоварени с хоризонтални сили и огъващи моменти*, София.  
Божинова-Хаапанен, А. (2021). *Деформационни свойства на структурирани глини*, София.  
Гълъбов М., Стоянов Н. (2005). *Динамика на подземните води*, София.  
Зееверт, Л. (1986). *Фундиране при трудни условия на земната основа*.  
Минков, В. (1965). *Фундиране*, София.

Трофименкова, Ю. (1969). *Справочник проектировщика*, Москва.  
Grundbau – Jdschenbuch, Band 1.2 Auflage, Berlin-Munchen, 1966.  
Sanglerat, (1965). *Le penetrometre et la rekonnaissance des sols*, Paris.  
Schnebeli, G. (1972). *Leparois moulesdans lesol*. Paris.  
[www.uacg.bg](http://www.uacg.bg), Еврокод 7: *Геотехническо проектиране*, 2007

# HYDROTHERMAL ALTERATIONS – A POWERFUL TOOL FOR THE EXPLORATION OF ORE DEPOSITS: A CASE STUDY FROM THE ZLATUSHA ORE OCCURRENCE, THE WESTERN SREDNOGORIE METALLOGENIC REGION, BULGARIA

**Stefan Velev, Boris Kretev**

Sofia University “St. Kliment Ohridski”, 1504 Sofia; E-mail: [velev@gea.uni-sofia.bg](mailto:velev@gea.uni-sofia.bg); [rmed@gea.uni-sofia.bg](mailto:rmed@gea.uni-sofia.bg); [boris.krestev@gmail.com](mailto:boris.krestev@gmail.com)

**ABSTRACT.** Hydrothermal alteration of host rock has always been one of the most powerful tools in mineral exploration. Each type of deposit presents particular configurations of alteration assemblages in time and space. The correct interpretations of hydrothermal events give information about ore genesis and the location of ore bodies. “Classic” alteration assemblages (phyllitic, potassic, argillic, propylitic etc.) may be present in a different type of deposits, but occur in different space configurations and, the particularities of each single deposit pose additional challenges in data interpretation and exploration endeavors. The Zlatusha ore occurrence is situated in the Western Srednogie metallogenic region, part of the Late Cretaceous Apuseni-Banat-Timok-Srednogie magmatic and metallogenic belt. The occurrence is epithermal, in particular of a low sulphidation, and gold-bearing type. Genetically and spatially, it assembles to the volcanic structure of the Zlatusha paleovolcanic centre. This study presents new field, petrographic, and XRD data about hydrothermally altered host rocks. Several styles of peri-ore alteration are distinguished – propylitic, quartz-sericite-pyrite (phyllitic), argillic – as well as some transitional subtype assemblages. The hydrothermal processes are complex and possibly overprinting one above the other. Based on the interpretation of the hydrothermal alterations, potential ore zones and bodies have been located.

**Key words:** hydrothermal alteration, mineral exploration, epithermal deposit

## ХИДРОТЕРМАЛНИТЕ ПРОМЕНИ КАТО ИНСТРУМЕНТ ПРИ ПРОУЧВАНЕТО НА РУДНИ НАХОДИЩА: ПРИМЕР ОТ РУДОПРОЯВЛЕНИЕ ЗЛАТУША, ЗАПАДНОСРЕДНОГОРСКА МЕТАЛОГЕННА ОБЛАСТ, БЪЛГАРИЯ

**Стефан Велев, Борис Кръстев**

Софийски университет „Св. Климент Охридски“ 1504 София

**РЕЗЮМЕ.** Хидротермалните промени на вместващите скали винаги са представлявали силен инструмент в процесите на проучване на полезни изкопаеми. Всяко находище се отличава с индивидуална конфигурация на променливи асоциации във времето и пространството. Правилните интерпретации на хидротермалните събития предоставят информация за рудния генезис и местоположението на рудните тела. „Класическите“ хидротермални минерални асоциации (филитови, калиеви, аргилитови, пропилитови и др.) могат да се наблюдават в различни типове находища, но се проявяват в строго индивидуални пространствени конфигурации, което поражда допълнителни предизвикателства в интерпретацията на данните и фактите. Рудопроявление Златуша се намира в Западносредногорската металогенна област, част от Апусени-Банат-Тимок-Средногорския магматичен и металогенен пояс от Късна креда. Рудопроявлението е епитермално, по-конкретно ниско сулфидно и злато-съдържащо. Генетично и пространствено асоциира с вулканските продукти на Златушенския палеовулкански център. В това изследване се представят нови теренни, петрографски и рентгенофазови данни за хидротермално променени скали. Разграничени са няколко типа околорудни изменения – пропилитов, кварц-серицит-пиритов, аргилизитов, както и някои преходни разновидности. Хидротермалните процеси са комплексни и вероятно наложени един върху друг. На базата на интерпретацията на хидротермалните разновидности са локализиран потенциални рудни зони и тела.

**Ключови думи:** хидротермални промени, проучване на полезни изкопаеми, епитермално находище

## Introduction

Hydrothermal alterations are powerful tools for the exploration of ore deposits; they provide critical clues about the processes and conditions that formed ore mineralisations.

The Zlatousha ore occurrence is situated in the Western Srednogie zone in Bulgaria, which in a regional aspect belongs to the Late Cretaceous Apuseni-Banat-Timok-Srednogie magmatic and metallogenic belt (Popov et al., 2002). The belt hosts a lot of economic Cu- and Au-rich porphyry and epithermal deposits.

Previous work concerning the Zlatousha ore occurrence presents data about host rocks, hydrothermal alterations, and some genetic aspects (Ferdov and Kunov, 2002).

The aim of this study is to add new data about structures, types, and styles of hydrothermal altered rocks.

## Sampling and analytical techniques

The samples from the hydrothermal altered rocks are collected from the mineralised zones. Polished thin sections were prepared to determine the structures and paragenetic

relationships of the primary and secondary minerals in order to characterise the hydrothermal alteration assemblages.

## Geology

The Zlatousha ore occurrence is of a low sulphidation deposit type (Sabeva et al., 2019), located in the Burel Ore Field (Popov and Popov, 2022) in the Western Srednogie Mountain, as it is determined by the Upper Cretaceous volcanic and plutonic rocks.

Genetically and spatially, it is related to the Zlatousha paleovolcano (Bairaktarov, 1989; Velev and Nedialkov, 2010). The volcanic structure is not well preserved, and is composed mainly of volcanoclastic (epiclastic and pyroclastic) rocks and less distributed lava flows and subvolcanic bodies. In some cases, a sequence of epiclastic products overlain by pyroclastic agglomerate covered by lava flows is distinguished.

The layers of pyroclastic and effusive rocks are subhorizontal, with a thickness of between 2 and 6 m. Several dykes and subvolcanic bodies are also established. To the north and northeast of the village of Zlatousha, several isometric to less elongated subvolcanic stocks are intruded in volcanoclastic

rocks and the intensive hydrothermal alteration is related with some of these magmatic events.

During the mapping of the hydrothermal alterations and lithology, two main extensive and homogeneous altered zones (phyllitic to argillic alteration) were mapped. The southern one has west-northwest strike direction. Possibly related to this is the other fault and hydrothermal system with northeast-southwest strike direction.

The field results show typical structural control of the hydrothermal processes and ore mineralisation, hosted by vertical to subvertical strike-slip fault system.

## Hydrothermal alterations

Several styles of alteration are distinguished: propylitic, quartz-sericite-pyrite (phyllitic), argillic, and some transitional subtypes of assemblages. The hydrothermal processes are complex and possibly overprinted one above the other. They

affect different types of volcanic rocks – porphyry, volcanoclastic, and hydrothermal breccias.

### Phyllic (quartz-sericite-pyrite) alteration

Phyllic alteration affects the coherent (subvolcanic) porphyry diorite and hydrothermal breccia bodies.

Hydrothermal breccias, whether as highly permeable host rocks or when directly fragmented during ore-forming activities, can provide favourable sites for ore forming fluids and can form high-grade ore bodies in porphyry and epithermal deposits. Breccias generally occur as steep, pipe-like bodies and are typically formed at the top of the intrusion.

The phyllic altered breccias at the Zlatousha ore occurrence are generally monomictic, matrix to clast, ore matrix-supported. They are composed of volcanic (andesitic) clasts and hydrothermal matrix. The fragments are ellipsoidal to subangular. The matrix is around 5-8 %, and is almost composed of secondary, hydrothermal minerals – quartz, sericite, muscovite, potassium feldspar, and rare biotite (Fig. 1).

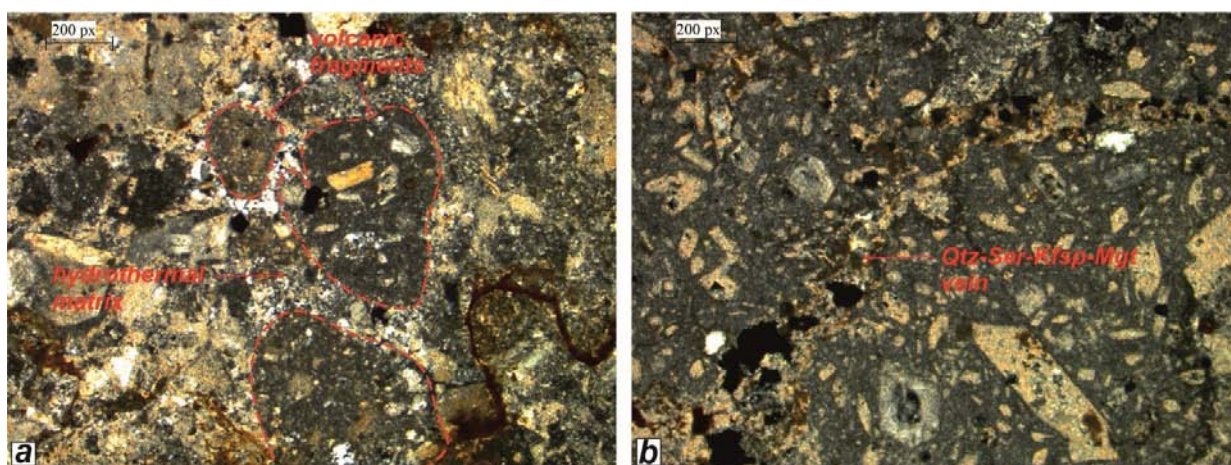


Fig. 1. Phyllic altered hydrothermal breccias: a) – Structural features (XPL); b) – Quartz-sericite-potassium feldspar veinlet (XPL)  
XPL – cross polarised lights; PPL – plain polarised lights

Quartz almost prevails in the matrix and in two types of veins: quartz-sulphides and quartz-potassium feldspar-sericite veinlets (Fig. 1). Sericite is developed in the matrix and replacement of the plagioclase phenocrysts. Muscovite occurs in the veins and forms nests in groundmass of volcanic fragments. The type of alteration is phyllic with diagnostic minerals, such as quartz, sericite and pyrite. The existence of potassium feldspar and rare biotite corresponds to potassium-silicate alteration. Porphyry rocks are also affected by phyllic alteration. The host rocks are classified as porphyry diorite to granodiorite. Phenocrysts are plagioclase, amphibole, biotite, and rare quartz. Typical hydrothermal minerals are quartz, sericite, muscovite and rare hydrothermal biotite (Fig. 2).

### Propylitic alteration

Propylitic alteration is observed in the periphery of mineralised hydrothermal zones, and based on the mineralogy is presented by two types: (1) quartz-epidote-sericite and (2) quartz-carbonate (calcite)-chlorite.

The first one is related with plagioclase and amphibole bearing porphyry diorite. The host rock undergoes intensive hydrothermal alteration, and primary magmatic structures and features are totally destroyed and altered. Hydrothermal

minerals replace all the phenocrysts and microlites of the groundmass.

Quartz prevails under other hydrothermal minerals. It is abundant in groundmass, where it built nests in association of epidote.

Epidote appears in association with quartz and as individual grains and clusters in groundmass.

Hydromica (sericite) is an altered product over plagioclase phenocrysts. Chlorite is rare (Fig. 3).

Low-temperature propylitic alteration is developed under porphyry dacites, with phenocrysts of plagioclase, amphibole, biotite, and quartz. Calcite and chlorite are hydrothermal minerals. Calcite mainly develops in groundmass and fills vesicles. Chlorite is rare and replaces mafic minerals (amphibole) (Fig. 4).

### Argillic alteration

The field and petrographic studies did not show typical mineral assemblages for the argillic type of hydrothermal alteration. Established secondary minerals, such as kaolinite, quartz, and zeolites, are possible to be related to some low-temperature hydrothermal event. The rocks affected by these alterations are monomictic tuffaceous sandstones to breccia-conglomerates.



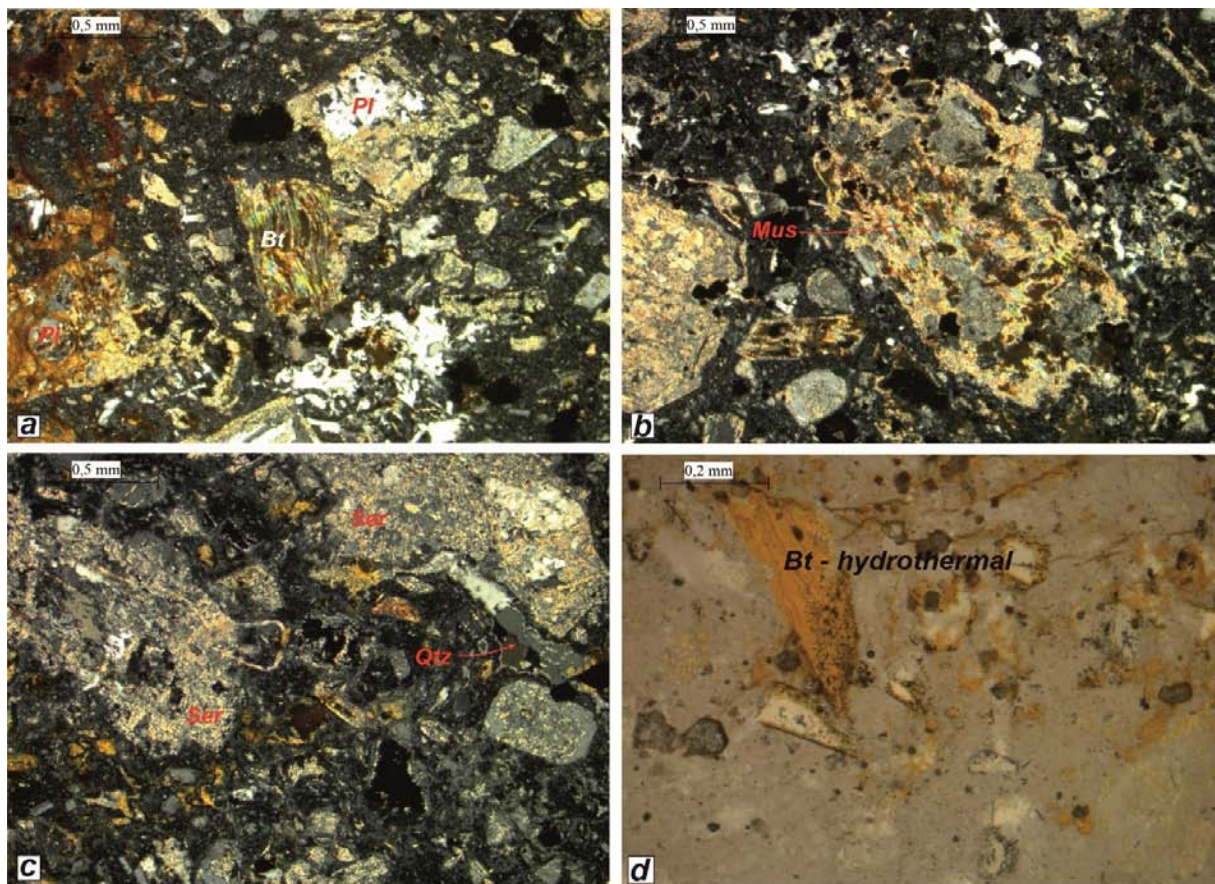


Fig. 2. Phyllic altered porphyry diorite to granodiorite: a) – Plagioclase and biotite phenocrysts (XPL); b) – Hydrothermal muscovite (XPL); c) – Hydrothermal quartz-sericite (XPL); d) – Hydrothermal biotite (PPL)

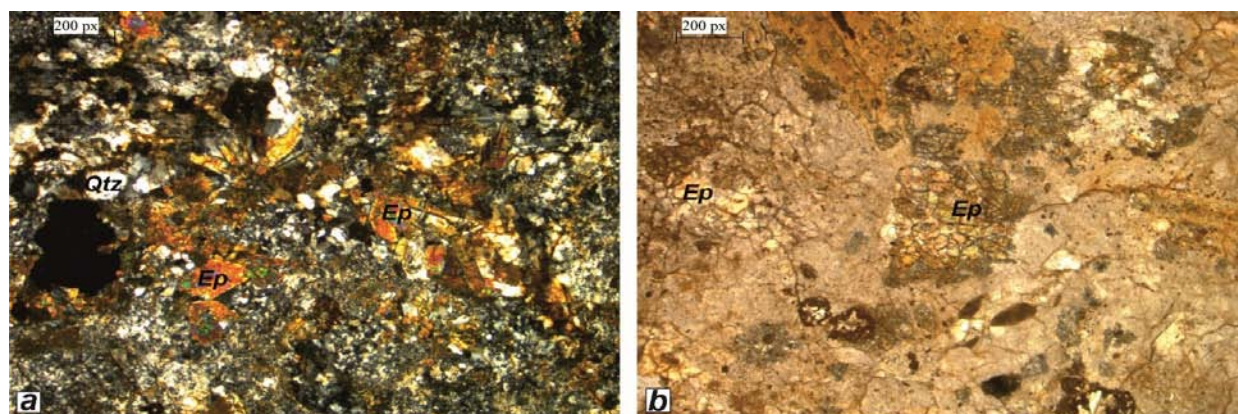


Fig. 3. Propylitic altered porphyry diorite: a) – Quartz and epidote (XPL); b) – Epidote (PPL)

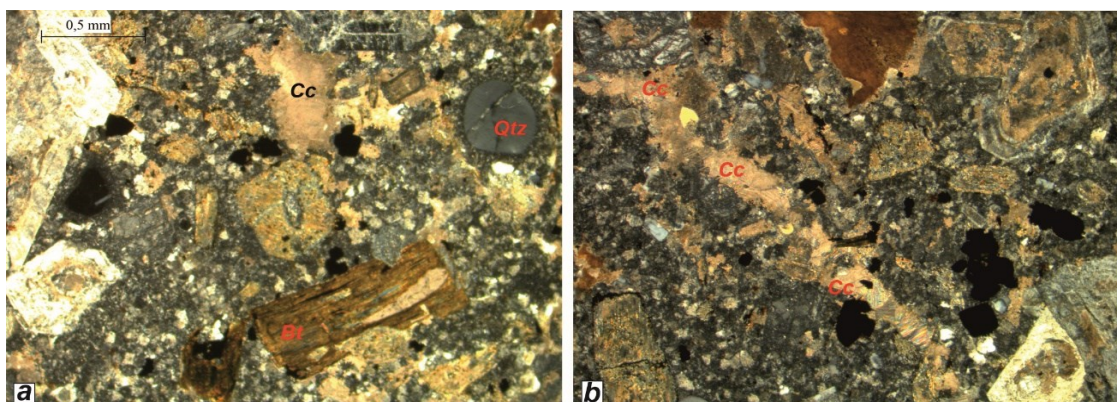


Fig. 4. Propylitic altered porphyry granodiorite: a) – Quartz and biotite phenocrysts (XPL); b) – Hydrothermal calcite (XPL)



## Conclusions

Hydrothermal alterations play a crucial role in exploration geology, especially when searching for porphyry and epithermal deposits. These deposits are often associated with hydrothermal systems where mineral-rich fluids alter the surrounding rocks, creating distinct alteration zones that can serve as indicators of ore presence.

The identification of alteration zones can guide exploration by indicating the potential location and size of ore bodies. For instance, in porphyry systems, the presence of potassic alteration may point to the centre of the deposit, while phyllic and argillic can indicate the upper and lateral extents. In epithermal systems, silicification and advanced argillic alteration can signal areas of potential high-grade mineralisation. By mapping these hydrothermal alteration patterns, geologists can more efficiently target drilling efforts, thereby reducing exploration costs and increasing the likelihood of discovering economically viable mineral deposits.

### The Zlatousha ore occurrence

Petrographic examination of the **phyllic alteration** demonstrates the existence of a mineral replacement susceptibility, with mafic silicates being the most susceptible to replacement by sericite and quartz, followed by cores of plagioclase to all the plagioclase phenocrysts, if the intensity of alteration was high. This type of alteration is locally texturally destructive, and the abundant pyrite indicates sulfur addition.

In some cases, phyllic alteration is associated with hydrothermal brecciated bodies (pipes), and is located at the intersection of two major fault systems. The breccia is dominated by clasts of andesites and quartz-sericite matrix.

In the western segment of the deposit, phyllic alteration is transitional to potassium-silicate metasomatic type (potassium feldspar-biotite), or there is overprinting of alteration processes. Typical phyllic mineral assemblages show the southernmost mineralised zone.

**Propylitic alteration** is observed in the periphery of ore zones, and is represented of two types: (1) Quartz-epidote-sericite and (2) Quartz-carbonate-chlorite

No typical mineral assemblages for **argillic alteration** is present.

### Acknowledgements

This study is supported by the KP-06-N74/6 project “Remote sensing and field studies of porphyry copper and epithermal ore systems from the Western Srednogie metallogenic region” funded by the National Science Fund of Bulgaria, Competition for funding fundamental scientific research – 2023.

The fieldwork was carried out with the support of *Velocity Minerals LTD.*

## References

- Bairaktarov, I. (1989). *Upper Cretaceous metallogeny of Western Srednogie and Plana Mountain*. Unpublished PhD Thesis. Sofia, Research Institute for Mineral Resources, 197 p. (in Bulgarian).
- Ferdov, S., Kunov, A. (2002). The Zlatousha occurrence, Sofia district – data for adularia-sericite epithermal type. – *Rev. Bulg. Geol. Soc.*, 63, 1–3, 131–137 (in Bulgarian with English abstract).
- Popov, P., Berza, T., Grubic, A., Dimitru, I. (2002). Late Cretaceous Apuseni-Banat-Timok-Srednogie (ABTS) magmatic and metallogenic belt in the Carpathian-Balkan orogen. – *Geologica Balc.*, 32, 2–4, 145–163.
- Popov, P., Popov, K. (2022). *Metallogeny of Bulgaria*, First Edition, In Bulgarian with extended summary in English, Sofia
- Sabeva, R., Velev, S., Georgieva, H. (2019). Geology, hydrothermal alteration, and ore mineralogy of the Zlatousha ore occurrence, Western Srednogie, Bulgaria. *Review of the Bulgarian Geological Society*, vol. 80, part 3, 2019, p. 80–82
- Velev, S., Nedialkov, R. (2010). Geological, petrographic, and geochemical peculiarities of the effusive rocks from the area of the village of Zlatousha (Western Srednogie). – *Proceedings of the National Conference “GEOSCIENCES 2010”*. Sofia, Bulg. Geol. Soc., 54–55.



# 3D CHRONOSTRATIGRAPHIC MODEL OF THE PALEOGENE IN THE EASTERMOST PART OF THE MOESIAN PLATFORM (NORTHEAST BULGARIA)

**Boris Valchev, Dimitar Sachkov**

University of Mining and Geology “St Ivan Rilski”, 1700 Sofia, Bulgaria; E-mails: [b\\_valchev@mgu.bg](mailto:b_valchev@mgu.bg), [dimitar.sachkov@mgu.bg](mailto:dimitar.sachkov@mgu.bg)

**Abstract.** This study is based on a chronostratigraphic interpretation of biostratigraphic data from 102 boreholes from the easternmost part of the Moesian Platform (Northeast Bulgaria) bordering the Black Sea Basin and including the southernmost part of the South Dobrogea Unit and the easternmost part of the North Bulgarian Dome with its eastern slope. Seven Paleogene chronostratigraphic units were recognised (the Thanetian, Ypresian, Lutetian, Bartonian, Priabonian, Rupelian, and Chattian stages). For the visualisation of their spatial distribution and relationships, a 3D chronostratigraphic model was created.

**Keywords:** Paleogene, chronostratigraphic units, Moesian Platform, Northeast Bulgaria, 3D modelling.

## ТРИИЗМЕРЕН ХРОНОСТРАТИГРАФСКИ МОДЕЛ НА ПАЛЕОГЕНСКАТА СИСТЕМА В НАЙ-ИЗТОЧНАТА ЧАСТ НА МИЗИЙСКАТА ПЛАТФОРМА (СЕВЕРОИЗТОЧНА БЪЛГАРИЯ)

**Борис Вълчев, Димитър Съчков**

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

**Резюме.** Настоящото изследване е базирано на хроностратиграфската интерпретация на биостратиграфски данни от 102 сондажа от най-източната част на Мизийската платформа (Североизточна България) на границата с Черноморския басейн, включваща най-южните части на южния склон на Добруджанския масив и източния склон на Севернобългарския свод. Установено е присъствието на седем палеогенски хроностратиграфски единици (Танетски, Ипрески, Лютески, Бартонски, Приабонски, Рупелски и Хатски етаж). За визуализирането на тяхното пространствено разположение е създаден триизмерен хроностратиграфски модел.

**Ключови думи:** Палеоген, хроностратиграфски единици, Мизийска платформа, Североизточна България, триизмерно моделиране.

### Introduction

This study is focused on the Paleogene rocks and the geological evolution of the easternmost part of the Moesian Platform (Northeast Bulgaria), bordering the Western Black Sea Basin. Its purpose is (i) to recognise the exact chronostratigraphic successions, and (ii) to elucidate the spatial distribution and relationships of the chronostratigraphic subdivisions.

In terms of the regional tectonics, the studied area comprises part of the Moesian Platform (Fig. 1), including partly the South Dobrogea Unit (Georgiev, 2012), which is also known as the Dobrogea Massive (Bokov et al., 1987; Dabovski, Zagorchev, 2009), as well as the easternmost part of the North Bulgarian Dome with its eastern slope (Dabovski, Zagorchev, 2009).

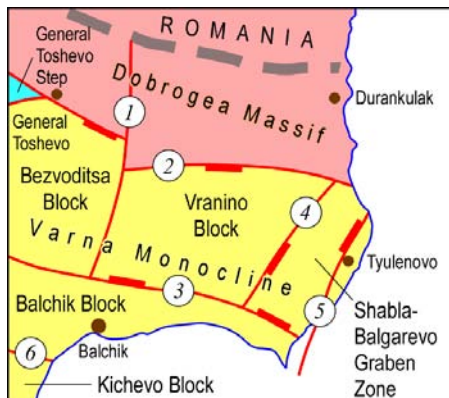


Fig. 1. Tectonic scheme of the studied area (after Bokov et al., 1987; Dabovski, Zagorchev, 2009; modified)

Faults: 1, Trigortsi; 2, Silistra-Belgun; 3, Bezvoditsa-Seltse; 4, Rakovo-Goron; 5, Balgarevo; 6, Batovo

### Material and methods

The investigation is based on integration of lithologic and stratigraphic data from 102 borehole sections, which are unevenly distributed across the studied area (Fig. 2). The primary data were obtained from 32 geological reports (kept at the National Geological Fund, Ministry of Energy of the Republic of Bulgaria) concerning the drilling for oil and gas, as well as the prospecting of the Dobrogea coal basin from the early 1950s to the 1980s (a list of reports, concerning the stratigraphic aspects of the Paleogene investigations were given by Valchev et al., 2018).

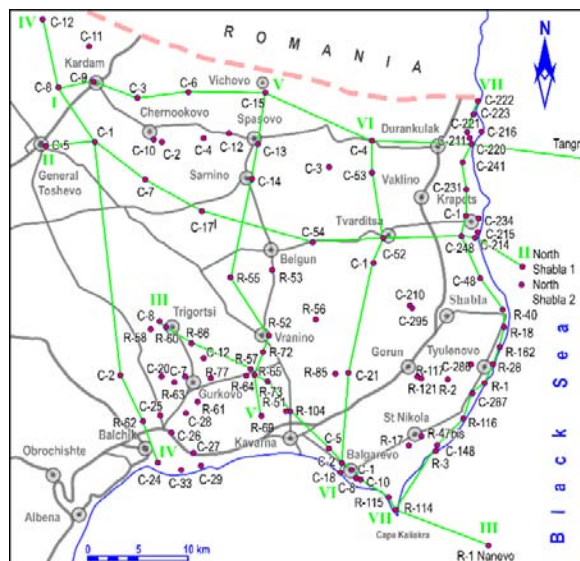


Fig. 2. Distribution of the studied borehole sections with the lines (in green) of the chronostratigraphic charts shown in Figs 4–10

The chronostratigraphic interpretation is based on reinterpreted biostratigraphic data from Shutskaya et al. (1972f<sup>1</sup>). Seven regional chronostratigraphic charts show the temporal distribution of the Paleogene lithostratigraphic units. For further visualisation of the spatial relationships of the chronostratigraphic subdivisions, a 3D model was created.

### Stratigraphic background

The geological investigations of the deep structure of the easternmost part of the Moesian Platform started in the early 1950s and by the end of 1980s more than 1000 boreholes were drilled. Until the beginning of the 1970s, the base of the Paleogene had been referred to the Danian belonging then to

the Upper Cretaceous (Fig. 3), and the Paleogene was divided into middle and upper Eocene covered with Oligocene deposits.

Stoyanoff (1962) divided and characterised the lower and middle Oligocene, the former with three horizons.

Shutskaya et al. (1972f), summarising the available lithological and paleontological data, proposed the first detailed stratigraphic subdivision. The “Danian” rocks were referred to the upper Paleocene, the Eocene was divided into lower–middle (corresponding to the middle Eocene of the previous investigations) and upper, comprising the Kuberin–Keresrin, Kumski, and Beloglin horizons. Eight packages were included in the Oligocene which was divided into lower–middle (packages I–III) and upper (packages IV–VIII).

Geological reports*	Stoyanoff, 1962	Shutskaya et al., 1972f	Yolkichev, Belmoustakov, 1982f	Cheshitev et al., 1995	Valchev et al., 2018	Valchev, Sachkov in this article		
						Series Stage	Lithology	Formation (thickness, m)
Oligocene	Oligocene middle lower	Oligocene upper lower middle	Oligocene clayey formation	Oligocene Ruslar Fm.	Oligocene Upper Lower	Oligocene Chattian Rupelian	sandy-clayey package (7–300) marly package (5–25) clayey-sandy package (10–100)	Ruslar Fm. (40–400)
Eocene	Eocene Lutetian Ypresian	Eocene Middle Lower	Eocene Avren Fm. Aladan Fm. Dikilitash Fm.	Eocene Priabonian Lutetian-Bartonian Ypresian	marly package (3–100) clayey package (2–11) marly limestone package (3–100) Aladan Fm. (4–70) Dikilitash Fm. (5–70) Beloslav Fm. (5–10) glauconitic marker (1–15) Komarevo Fm. (10–26)	Avren Fm. (4–200)		
							Upper Cretaceous	Upper Cretaceous (Danian)



Fig. 3. Stratigraphic background and subdivision of the Paleogene in the Dobrogea area

1, marls; 2, marly limestones; 3, bioherms; 4, organogenic limestones; 5, limestones; 6, clays; 7, silts; 8, sandstones; 9, silts; 10, sands; 11, glauconitic sandstones and sands

\* This column summarises the lithologic and stratigraphic data obtained from 27 geological reports from the early 1950s to the early 1970s (for reference see Valchev et al., 2018)

Belmoustakov (in: Yolkichev, Belmoustakov, 1982f<sup>2</sup>) studied 16 borehole sections and defined five lithostratigraphic units: a silty limestone formation (Thanetian), a formation of sandstones and sands (Ypresian), a nummulitic limestone

formation (Lutetian), a marly formation (Priabonian), and a clayey formation (Priabonian–Oligocene).

On the basis of foraminifera (small and larger) and calcareous nanoplankton, Aladjova-Khrisheva et al. (1983)

<sup>1</sup> Shutskaya, E., Y. Vaptsarova, M. Tanev, B. Goncharenko, D. Dencheva, A. Dianov, K. Jekova, V. Ignatova, M. Kehayova, G. Kulaksazov, T. Nikolov, A. Olferyev, A. Pozemova, I. Sapunov, Ch. Spasov, S. Stefanov, Y. Tenchov, E. Trifonova, D. Tronkov, P. Tsaneva, V. Tsankov, S. Yanev. 1972f. Report on Topic I. Subdivision and Correlation of Borehole Sections in North Bulgaria.

Ministry of Energy, National Geological Fund, report III-247, 959 p. (in Russian, unpublished).

<sup>2</sup> Yolkichev, N., E. Belmoustakov. 1982f. Stratigraphy of the Upper Cretaceous and Paleogene in Northeast Bulgaria and the Black Sea shelf. Ministry of Energy, National Geological Fund, report XV-525, 165 p. (in Bulgarian, unpublished).

proved that the nummulitic limestone formation of Belmoustakov was of lower Eocene age, and that the lower levels of the marly formation belonged to the middle Eocene.

Dzurakov and Darakchieva (1986) formalised the marly formation (introduced as the “Avren marls” by Gočev, 1933) as the Avren Formation and gave planktonic foraminiferal data determining a lower Eocene age for the lowermost levels of the unit.

Filipov (1995) and Cheshitev et al. (1995) referred the silty limestone formation to the Thanetian Komarevo Formation (introduced by Dachev, 1975 in Central North Bulgaria), recognised the lower Eocene Dikilitash and Aladan Formations (both introduced by Gočev, 1933 and formalised by Aladjova-Khrisheva, 1984), confirmed the presence of the Avren Formation (determining its lower–middle Eocene age), and the uppermost levels of the Paleogene were included in the Oligocene Ruslar Formation (introduced by Zlatarski, 1927 and formalized by Aladjova-Chrischeva, 1991).

Valchev and Juranov (in: Valchev et al., 2018) studied more than 600 borehole sections and refined the lithostratigraphic scheme. They confirmed the presence of the Komarevo Formation. The lower Eocene succession was divided into a glauconitic marker, the Beloslav and Dikilitash Formations, corresponding to the “Dikilitash Formation” of Filipov (1995) and Cheshitev et al. (1995), and the Aladan Formation. The authors subdivided both the Avren (uppermost Lower Eocene–Upper Eocene) and Ruslar (Oligocene) Formations into three distinct packages, reinterpreted the available biostratigraphic data, and gave additional data for the chronostratigraphic range of the lithostratigraphic units. Their spatial distribution was visualised by the generation of a 3D lithostratigraphic model (by Sachkov).

## Chronostratigraphic units

We recognised the Thanetian Stage of the Paleocene, the Ypresian, Lutetian–Bartonian, and Priabonian Stages of the Eocene, the Rupelian and Chattian Stages of the Oligocene (the spatial distribution of the units is shown in Figs. 4–10 by compiling seven regional chronostratigraphic charts).

### Paleocene

**Danian and Selandian.** These stages have not been established in the study area. The rocks determined as “Danian” in the geological reports belong to the Upper Cretaceous or more often to the Thanetian.

**Thanetian.** It comprises the entire Komarevo Formation. The thickness of the unit varies from 5–6 m (in the northern part of the study area), rarely up to 26 m (in the area of Tyulenovo), but it is usually 10–15 m. It gradually increases from the west to the east and southeast. The unit covers different levels of the Upper Cretaceous, as the boundary is an unconformity. The upper boundary is an unconformity with different levels of the Ypresian. In the primary descriptions in the earlier geological reports, these rocks were referred to the “Danian”. Only the summarising work of Shutsckaya et al. (1972f) represents these levels as “Upper Paleocene”.

### Eocene

**Ypresian.** The stage comprises the glauconitic marker, the Beloslav, Dikilitash and Aladan Formations, as well as the lower levels of the marly limestone package of the Avren Formation. The thickness varies broadly from 4 m (the Kardam locality) to

139 m (the Tangra borehole), but it is usually 50–80 m. Generally, it increases from the Northwest to the East and Southeast. The lower boundary is an unconformity with different levels of the Upper Cretaceous or the Thanetian. The upper boundary is conformable with the Lutetian, or represents an unconformity with the Priabonian (the Krapets locality) or the Rupelian (the entire northernmost part of the Dobrogea area).

**Lutetian.** The middle and upper levels of the marly limestone package of the Avren Formation are included in this stage. The lower boundary is conformable with the Ypresian. The upper boundary is also conformable with the Bartonian.

**Bartonian.** It comprises the uppermost levels of the marly limestone package of the Avren Formation and the entire clayey package of the Avren Formation. The lower boundary is conformable with the Lutetian. The upper boundary is conformable with the Priabonian or unconformable with the Rupelian.

As there is no enough biostratigraphic data to define exactly the Lutetian–Bartonian boundary, the two stages are presented as a unified body in the 3D model. Its thickness varies from 5 m (the Gurkovo area) to 94 m (the St Nikola area) and gradually increases to the Southeast.

**Priabonian.** It is represented by the marly package of the Avren Formation. The thickness varies broadly from 5 m (the Krapets area) to 89 m (the Tyulenovo area). Generally, it increases gradually to the South and Southeast. The lower boundary is conformable with the Bartonian. The upper boundary is an unconformity with the Rupelian.

### Oligocene

The Rupelian and Chattian Stages have not been defined in Northeast Bulgaria due to the scarce biostratigraphic data. Here, we accept that they correspond to the “lower Oligocene” and the “upper Oligocene” that were previously divided (see Fig. 3).

**Rupelian.** It comprises the clayey-sandy and marly packages of the Ruslar Formation. The thickness varies very broadly from 8 m (the Spasovo area) to 202 m (the Vranino area), as it increases to the Southeast. The lower boundary is unconformable with the Priabonian. The upper boundary is a conformity with the Chattian or an unconformity with the Neogene.

**Chattian.** The sandy-clayey package of the Ruslar Formation is included in this stage. The thickness varies very broadly from 14 m (the Spasovo and Trigortsi areas) to 376 m (the Kavarna-Balgarevo area) and sharply increases to the east-southeast. The lower boundary is conformable with the Rupelian. The upper boundary is an unconformity with the different levels of the Neogene. There are no data concerning the duration of the hiatus.

## Regional chronostratigraphic aspects

It can be seen that the thinnest Paleogene succession was recorded in the northwesternmost part of the study area (the Kardam and General Toshevo localities), where only the Ypresian is present (Figs 4, 5, 7). In the Spasovo locality, despite the last, the Thanetian, Rupelian and Chattian occur (Figs 4, 8), while in the Durankulak locality and to the East

offshore, the Paleogene section includes the Ypresian, Rupelian and Chattian only (Figs 4, 10). A slow increase of the units' thickness to the East was recorded.

The central localities represent three situations. West of the village of Belgun, the Ypresian and Rupelian comprise the Paleogene succession (Figs 5, 8), while between the villages of Belgun and Tvarditsa, it is composed of the Thanetian, Ypresian, Rupelian and Chattian (Fig. 5). In the Krapets locality (south of the village) and to the East offshore, the Priabonian appears, and thus, despite the last, the section is composed of the Ypresian, Rupelian and Chattian (Figs 5, 10). The thickness of all units is almost constant.

The southwestern part of the study area (the Dobrogea coal basin) reveals a complicated geologic structure and great

variations of the stratigraphic record. In a small area near the village of Trigortsi, the Paleogene section, three situations could be seen (Figs 6, 8, 9). The Ypresian, Rupelian and Chattian are present northwest of the village, the Thanetian, Ypresian and Rupelian were established around the village, and to the southeast the Lutetian–Bartonian appear. In the Balchik locality (Fig. 7), the Paleogene succession includes the Thanetian, Ypresian, Lutetian–Bartonian, Rupelian, and Chattian. In the Vranino area (Figs 6, 8), only the Ypresian, Rupelian, and Chattian were recorded, while the Kavarna locality (Figs 6, 8) reveals a complete Paleogene section (from the Thanetian to the Chattian).

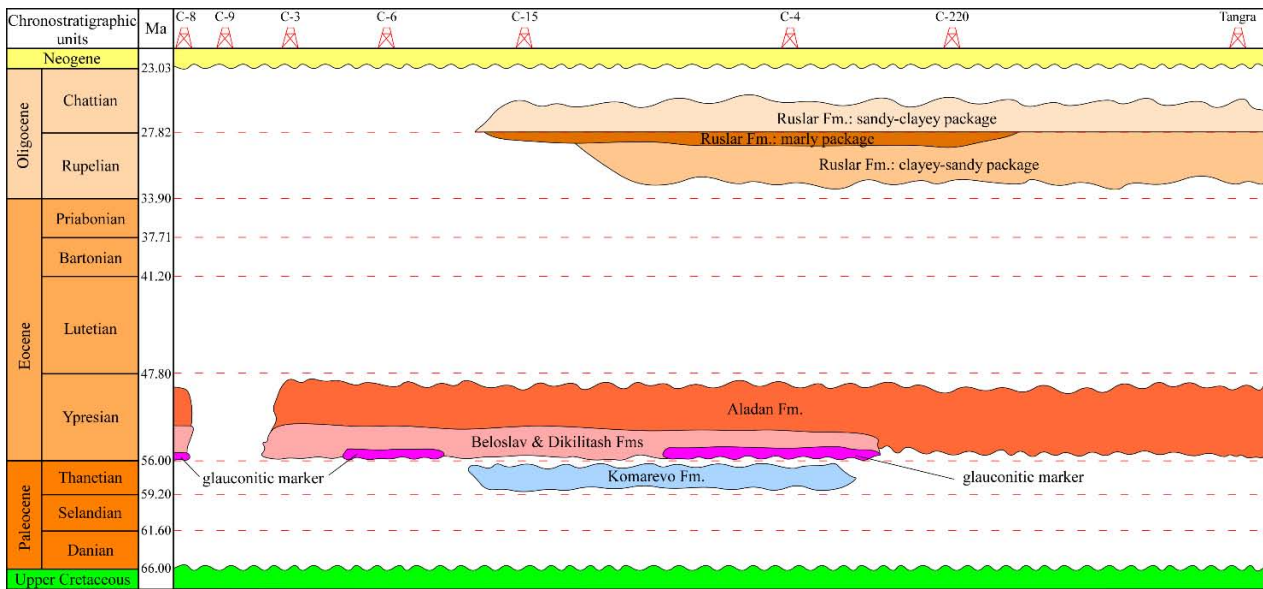


Fig. 4. Regional chronostratigraphic chart I-I

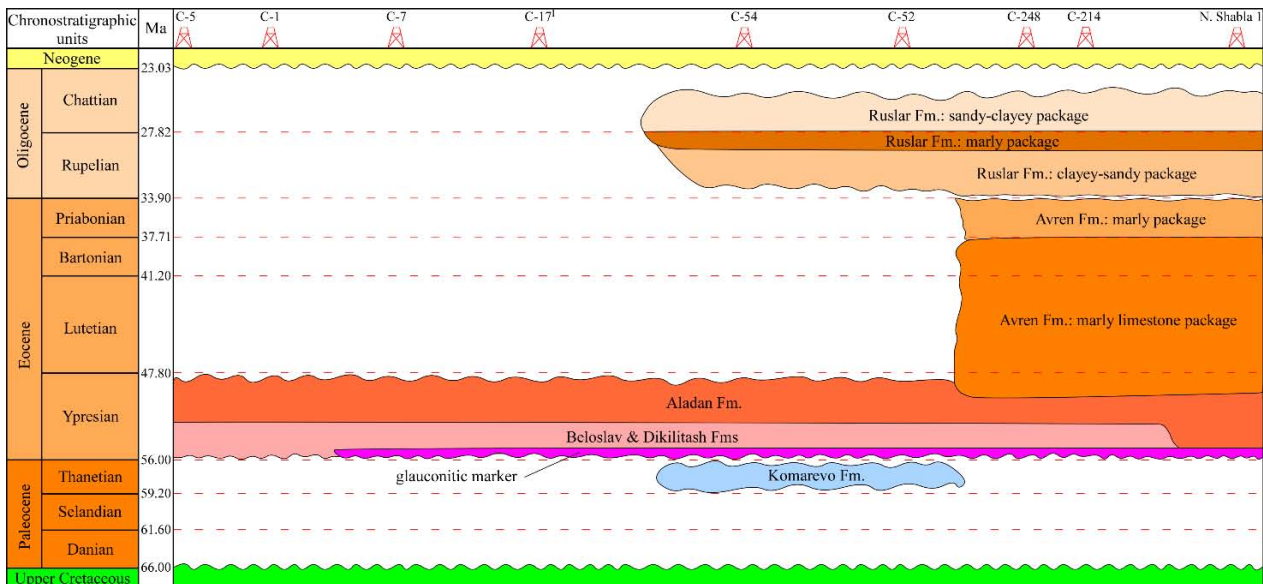


Fig. 5. Regional chronostratigraphic chart II-II

The same chronostratigraphic record was established in the Balgarevo–Cape Kaliakra locality (Figs 6, 9, 10), as thickness variations of the Priabonian and Chattian were observed. To the southwest offshore (R-1 the Nanevo locality), the Thanetian

disappears and the thickness of the Priabonian–Chattian interval sharply decreases.

The coastal region between Cape Shabla and Cape Kaliakra reveals a complete Paleogene succession except the



Tyulenovo locality, where the Thanetian is not present (Fig. 10). Variations of the Rupelian and Chattian’s thickness were recorded.

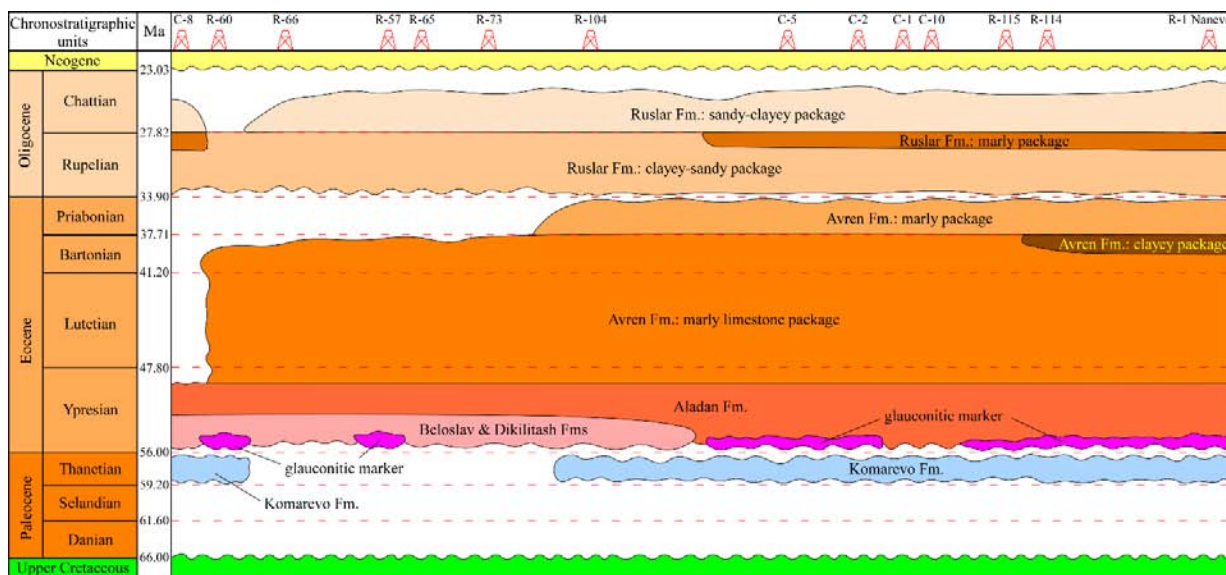


Fig. 6. Regional chronostratigraphic chart III-III

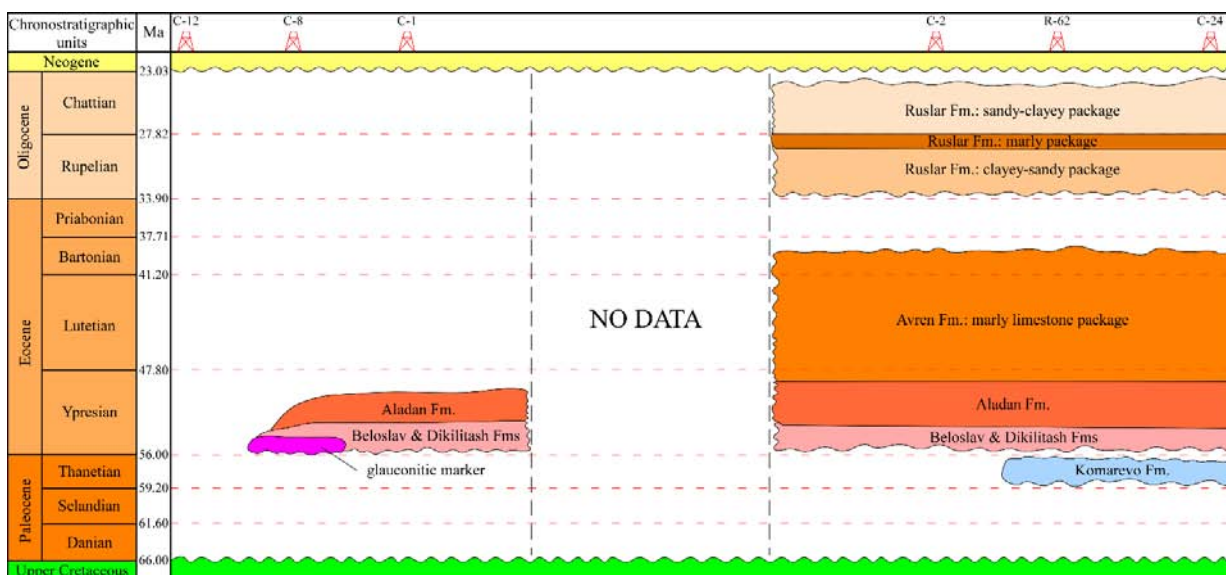


Fig. 7. Regional chronostratigraphic chart IV-IV

### 3D chronostratigraphic model

For further visualisation of the spatial distribution of the chronostratigraphic succession, a 3D model was created. For its generation, individual sets of chronostratigraphic bodies were established. They include base, cover, and six bodies concerning the Paleogene chronostratigraphic units (Fig. 11).

The base of the Paleogene succession in the whole study area is the Upper Cretaceous (Fig. 11a).

The distribution of the Thanetian is not ubiquitous (Fig. 11b). This fact could be interpreted as Thanetian non-deposition in broad areas or the presence of partial pre-Eocene local erosion on the carbonate platform.

The Ypresian is distributed over the whole study area (Fig. 11c), but is represented by various rock sequences due to the presence of a dynamic sedimentary environment and a very

rapid transformation of basin conditions. The sedimentary environments of the Ypresian are diverse, rapidly changing, and migrating. A hiatus of varying duration is recorded in the upper part of the Ypresian. It is long-lasting in the north-western parts of the onshore part of the study area and in the Black Sea (Figs 5, 7). In the interior of the stage, the occurrence of short-term interruptions is also possible. In some areas, the highest levels of the Ypresian are missing. This patterning of the upper stage boundary is probably related to later events, but it is a fact that the boundary reflects erosional processes affecting the sediments of this stage as well.

In general, the Lutetian and Bartonian rocks have a more restricted distribution compared to those of the Ypresian (Fig. 11d). The sections are lithologically more monotonous. There are no hiatuses in both stages.



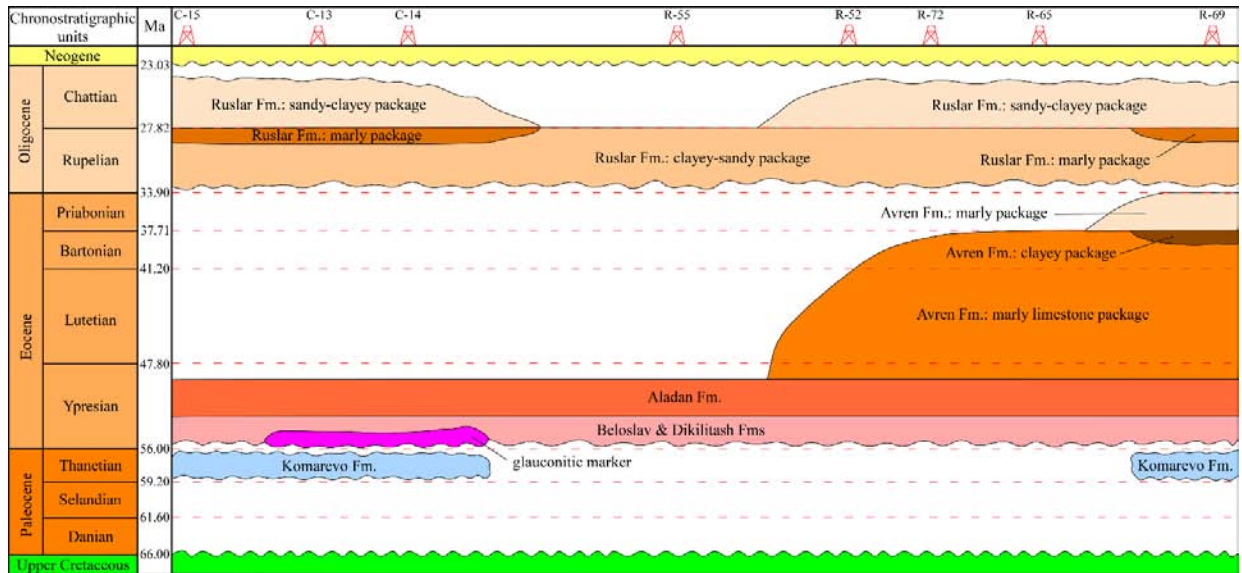


Fig. 8. Regional chronostratigraphic chart V-V

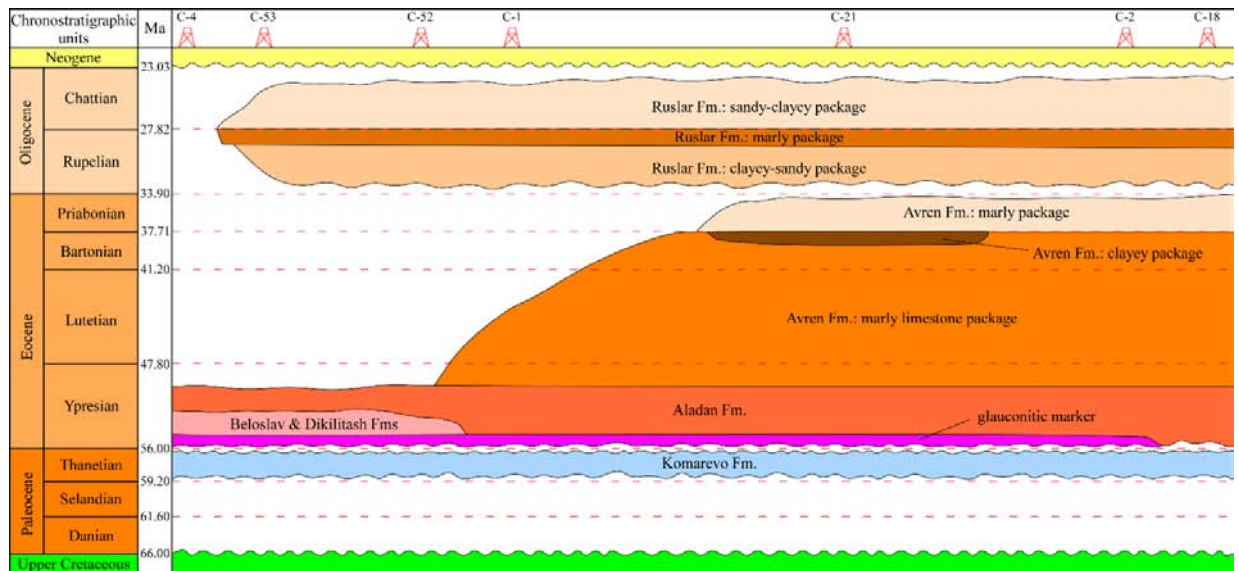


Fig. 9. Regional chronostratigraphic chart VI-VI

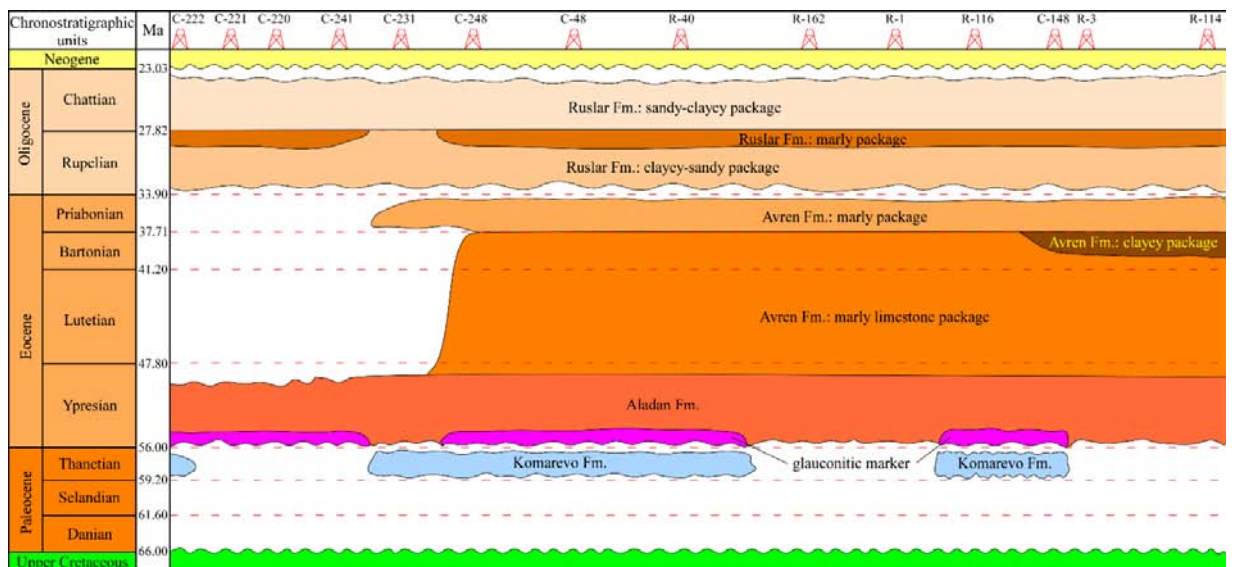


Fig. 10. Regional chronostratigraphic chart VII-VII

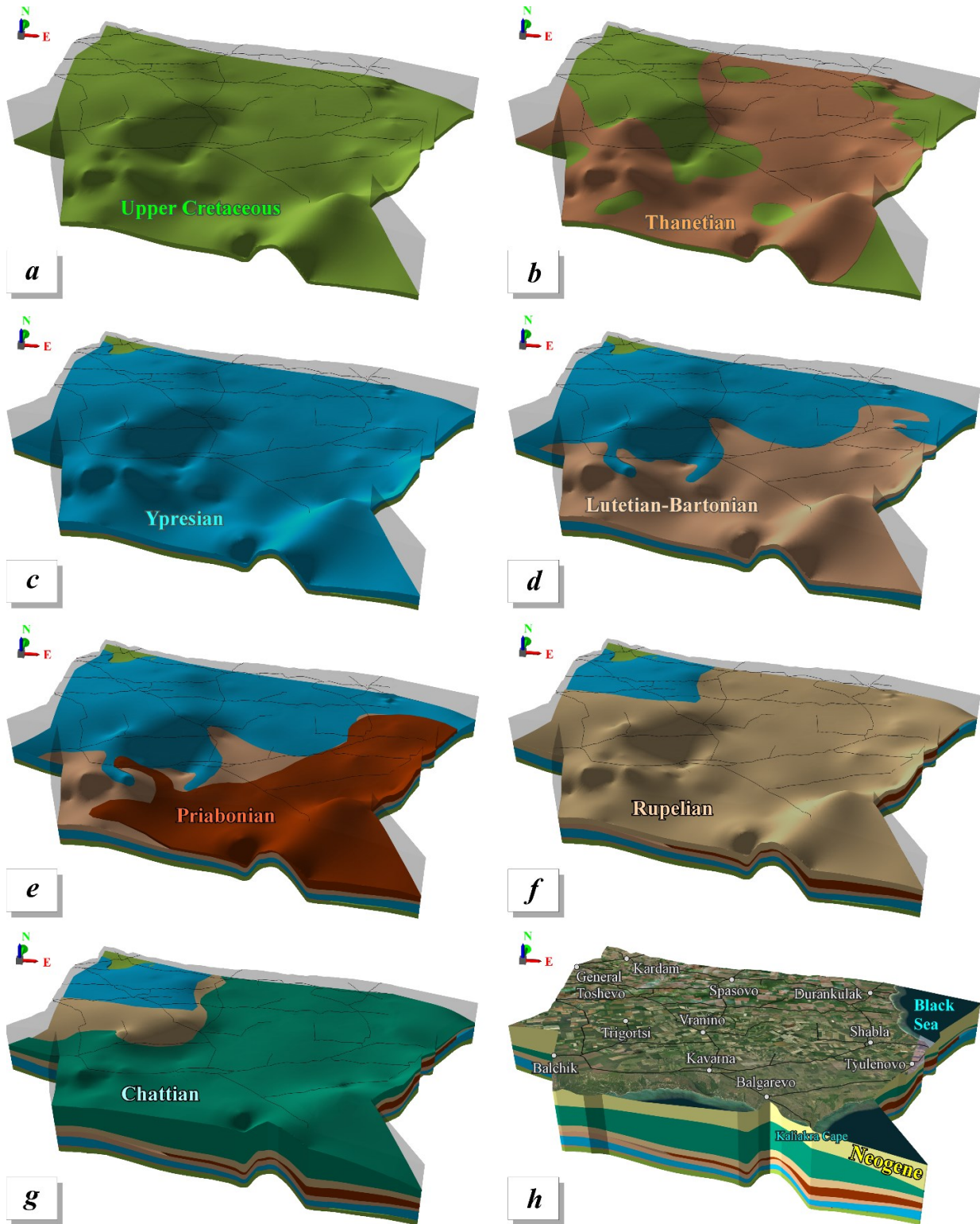


Fig. 11a. 3D model of the Upper Cretaceous base (a), the Paleogene chronostratigraphic units (b–g), and the Neogene cover (h)

The distribution of the Priabonian is restricted to the southernmost and easternmost parts of the study area (Fig. 11e). It is unlikely that they were not deposited in its other parts. Rather, this absence is the result of significant pre-Oligocene erosion, which also affects the Lutetian and Bartonian and sometimes even the Ypresian.

The pre-Oligocene erosion is one of the most notable events of the Paleogene at the easternmost part of the Moesian Platform. It is associated with the complete transformation of the

basin regime and the complete change of sedimentary settings at the beginning of the Oligocene.

The Rupelian (Fig. 11f) has a relatively wider spatial distribution as compared to the Lutetian–Priabonian rocks. The hiatus along its lower boundary is short-lasting in time, but in certain areas this boundary is associated with continuous erosion affecting all older levels of the Palaeogene. Typically, this situation marks the margin of the Paleogene basin.

Despite the the northwestern part of the study area, only three of the interpreted sections (in Trigortsi area) clearly show the absence of the Chattian sediments (Figs 6, 8, 9, 11g), indicating the presence of local but deep scour affecting the entire stage.

The Neogene covers the entire study area (Fig. 11h).

## Conclusions

The chronostratigraphic interpretation of the available biostratigraphic data allowed compiling a reliable database for visualising and analysing the spatial distribution of the Paleogene chronostratigraphic units. Thus, the complicated deep structure of the easternmost part of the Moesian Platform was confirmed and revealed in detail.

The block structure of the basement and the differences in the sedimentary sequences on the individual blocks indicate that the formation of the tectonic boundaries between them occurred at an older time, and their effect on sedimentation is the result of a later reactivation, with different intensities, depending on the geodynamic setting and stress field distribution. To the extent that the block structure of the basement and fault reactivation can influence sedimentation, they determine the different degrees of preservation of sedimentary sequences on the individual blocks, confined between major unconformities, on the formation of local depocentres, and hence, relatively different lithologies within them, areas of unconformity, scouring or condensed sedimentation, possibly the presence of fault-dominated sediments.

Considering that sedimentation occurs mostly in stable epicontinental conditions, the section is dominated by shallow-water sedimentation, suggesting rapid facies migration and a relatively narrow chronostratigraphic range of diachronous boundaries, and the lithological boundaries can be assumed to be synchronous within the range of a century or even an epoch.

The 3D chronostratigraphic model shows the location and duration of the hiatuses in the Paleogene section, as well as the relative rates of sedimentation for individual zones in the basin. Thus, it provides good opportunities for further research and conclusions in the field of basin analysis and sequence stratigraphy.

**Acknowledgements.** This article is in memory of Dr Sava Juranov, who introduced us to the Paleogene stratigraphy of Northeastern Bulgaria.

## References

Aladjova-Khrischeva, K. (1984). Stratigraphie des dépôts éocènes aux environs du village Beloslav, département de Varna. – *Rev. Bulg. Geol. Soc.*, 45, 1, 33–44 (in Bulgarian with French abstract).

- Aladjova-Chrischeva, K. (1991). Stratigraphic subdivision and correlation of Paleogene deposits in Northeast Bulgaria. – *Geologica Balc.*, 21, 2, 12–38 (in Russian with English abstract).
- Aladjova-Khrischeva, K., Muzilev, N. G., Juranov, S. (1983). New data on the Paleogene stratigraphy of Northeast Bulgaria. – *C. R. Acad. Bulg. Sci.*, 36, 7, 937–940 (in Russian).
- Bokov, P., Georgiev, G., Monahov I., Atanasov, A., Jeleu, S., Dachev, Ch., Yordanova, D., Vavilova, M., Nikolova, M., Ognyanov, R. (1987). Tectonic zoning. – In: Bokov, P., Ch. Chamberski (Eds), *Geological Premise for the Oil-gas Bearing of the Northeast Bulgaria*. Sofia, Tehnika, 109–119 (in Bulgarian).
- Cheshitev, G., Chontova, Tz., Popov, N., Kojumdjieva, E. (1995). *Explanatory Notes for the Geological Map of Bulgaria in Scale 1:100 000, Balčik and Šabla Map Sheets*. Sofia, Committee of Geology and Mineral Resources, Geology and Geophysics Ltd, 51 p. (in Bulgarian with English abstract).
- Dabovski, H., Zagorchev, I. (2009). Alpine tectonic subdivision of Bulgaria. – In: Zagorchev, I., H. Dabovski, T. Nikolov (Eds). *Geology of Bulgaria. Part II, Mesozoic Geology*. “Prof. Marin Drinov” Publishing House, Sofia, 30–37 (in Bulgarian with English abstract).
- Datchev, D. (1975). Stratigraphie des dépôts Paléocènes dans la région de Pleven. – *Rev. Bulg. Geol. Soc.*, 36, 1, 37–48 (in Bulgarian with French abstract).
- Dzurinov, S., Darakchieva, S. (1986). Early–middle Eocene planktonic foraminifera from Dobrudža (Northeast Bulgaria). – *Palaeontol., Stratigr., Lithol.*, 23, 3–24 (in Bulgarian with English abstract).
- Filipov, L. (1995). *Explanatory Notes for the Geologic Map of Bulgaria in Scale 1:100 000, General Toševo and Mangalija Map Sheets*. Sofia, Committee of Geology and Mineral Resources, Geology and Geophysics Ltd, 33 p. (in Bulgarian with English abstract).
- Georgiev, G. (2012). Geology and Hydrocarbon Systems in the Western Black Sea. – *Turkish J. Earth Sci.*, 21, 723–754; doi:10.3906/yer-1102-4.
- Gočev, P. (1933). Paläontologische und stratigraphische Untersuchungen über das Eocän von Varna. – *Rev. Bulg. Geol. Soc.*, 5, 1, 1–82 (in Bulgarian with German abstract).
- Stoyanoff, E. (1962). Sur la répartition stratigraphique de l’Oligocène dans la région de Varna. – *Ann. Dir. Gen. Rech. Géol.*, 12, A, 123–140 (in Bulgarian with French abstract).
- Valchev, B., Sachkov, D., Juranov, S. (2018). 3D lithostratigraphic model of the Paleogene of the onshore part of the Moesian Platform (Northeast Bulgaria). – *Geologica Balc.*, 47, 1, 23–36; doi:10.52321/GeolBalc.47.1.23.
- Zlatarski, G. (1927). *La Géologie de la Bulgarie*. Sofia, Publ. House “Hudozhnik”, Univ. Library, 65, 268 p. (in Bulgarian with French abstract).



# **“INTERDISCIPLINARY RESEARCH FOR THE CREATION OF AN INTERACTIVE DATABASE AND ASSESSMENT OF THE GEOCONSERVATION POTENTIAL OF FOSSIL DEPOSITS OF SIGNIFICANT SCIENTIFIC AND MUSEUM VALUE FROM BULGARIA” – PROJECT RESULTS OVERVIEW**

***Boris Valchev, Dimitar Sachkov***

*University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia, Bulgaria; E-mail: b\_valchev@mgu.bg*

**ABSTRACT.** The project proposes an interdisciplinary approach, new for the Bulgarian scientific community, in the study of fossil deposits as part of the Bulgarian national geological heritage: integration of traditional geological methods (geological mapping, paleontological, stratigraphic, biochronological, geochronological, micropaleontological research) and modern geomorphological and geoinformation methods and techniques for the identification and imaging of fossil deposits of high scientific and museum value, processing, visualisation, and promotion of data. This article reviews the results obtained in the first phase (November 2021–May 2023). Criteria, indicators, and parameters for the quantitative assessment of specific features of fossil geosites have been defined; an expert map has been compiled for the assessment of fossil geotopes for the purposes of geotourism; 23 sites of high scientific and museum value have been identified, and scientific dossiers have been compiled for 16 of them as a basis for the future register of fossil sites in Bulgaria. A preliminary version of an interactive portal has been prepared.

**Key words:** fossil geosites, geoconservation, scientific and museum value.

## **ПРОЕКТ „ИНТЕРДИСЦИПЛИНАРНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ ЗА СЪЗДАВАНЕТО НА ИНТЕРАКТИВНА БАЗА ДАННИ И ОЦЕНКА НА ГЕОКОНСЕРВАЦИОННИЯ ПОТЕНЦИАЛ НА ФОСИЛНИ НАХОДИЩА СЪС ЗНАЧИМА НАУЧНА И МУЗЕЙНА СТОЙНОСТ ОТ БЪЛГАРИЯ“ – ПРЕГЛЕД НА РЕЗУЛТАТИТЕ**

***Борис Вълчев, Димитър Съчков***

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

**РЕЗЮМЕ.** В проекта се предлага нов за България интердисциплинарен подход при изучаването на фосилните находища като част от българското национално геолошко наследство: интегриране на традиционни геоложки (геолошко картиране, палеонтоложки, стратиграфски, биохронологички, геохронологички, микропалеонтоложки изследвания) и геоморфоложки методи в съчетание със съвременни дистанционни и геоинформационни методи и техники за идентифициране и заснемане на фосилни находища с висока научна и музейна стойност, обработване, визуализиране и популяризиране на данни. Настоящата статия прави преглед на получените през първия етап (ноември 2021–май 2023 г.) резултати. Дефинирани са критерии, индикатори и параметри за количествена оценка на специфични черти на фосилни геосайтове, съставена е експертна карта за оценка на фосилни геотопи за целите на геотуризма, идентифицирани са 23 находища с висока научна и музейна стойност, като за 16 от тях са съставени научни досиета като основа на бъдещия регистър на фосилните находища в България. Подготвен е работен вариант на интерактивен портал.

**Ключови думи:** фосилни геотопи, геоконсервация, научна и музейна стойност.

## **Въведение**

Фосилните находища са неотделима част от геоложкото наследство на всяка една страна, а оттук, наред с археоложкото, етнографското, архитектурното, историческото, и част от нейното културно наследство. В много страни те са обект на особен научен и обществен интерес. Световноизвестни фосили находища като Ediacara в Австралия, Burgess Shale в Канада, Solnhofen в Германия и много други, придобиха популярност с ключовата роля на намерените в тях фосили за органичната еволюция на планетата. Обект на целогодишен туризъм са и обширните фосилни полета, които дават имената на прочути природни паркове като „Вкаменената гора“ в Аризона, „Парк на динозаврите“ в Юта и Колорадо, „Парк на Кредния период“ в Китай и др. (Sinnyovsky, 2023b).

В светлината на тази световна тенденция, екип от водещи палеонтолози, стратиграфи, геоморфолози, геоинформатици и експерти по геоконсервация, с участието на докторанти и студенти, представи пред Фонд „Научни изследвания“ при Министерството на образованието и науката проекта „Интердисциплинарни изследвания за създаването на интерактивна база данни и оценка на геоконсервационния потенциал на фосилни находища със значима научна и музейна стойност от

България“. Основната част от екипа включва преподаватели, докторанти и студенти от Минно-геоложкия университет „Св. Иван Рилски“ (базова организация) в сътрудничество с учени и докторанти от Националния природонаучен музей–БАН (партньорска организация), Софийския университет „Св. Климент Охридски“ и Геологическия институт „Акад. Страшимир Димитров“ при БАН.

В проекта се предлага нов за България интердисциплинарен подход при изучаването на фосилните находища като част от българското национално геолошко наследство: интегриране на традиционни геоложки (геолошко картиране, палеонтоложки, стратиграфски, биохронологички, геохронологички, микропалеонтоложки изследвания) и геоморфоложки методи в съчетание със съвременни дистанционни и геоинформационни методи и техники за идентифициране и заснемане на фосилни находища с висока научна и музейна стойност, обработване, визуализиране и популяризиране на геопроостранствени данни.

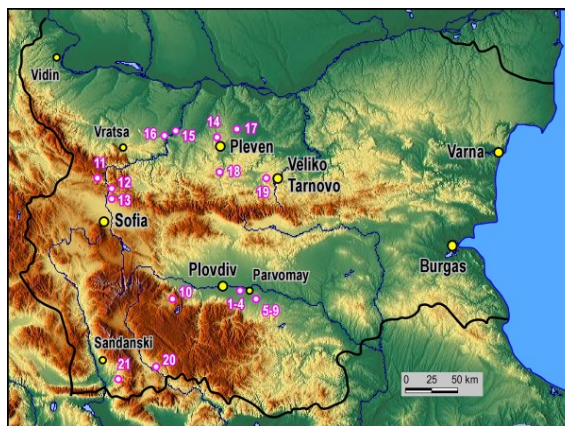
Основните цели на проекта са: идентифициране на фосилни находища с потенциално висока научна и музейна значимост, анализ на наличната литература и инвентаризация на колекциите, свързани с тях; теренни палеонтоложки, стратиграфски, геоморфоложки и дистанционни изследвания, свързани с идентифицирането

на находищата; теренно събиране на данни за геоконсервационния потенциал на находищата; съставяне на научна основа на досиета и регистър на фосилните находища; изграждане на интерактивна база данни; съставянето на геосървър и дигитална карта за пространственото разположение на фосилните находища. В завършен вид, събраната информация ще бъде достъпна на интерактивен портал.

Настоящата статия прави преглед на получените през първия етап на работата по проекта (ноември 2021–май 2023 г.) резултати.

## Състояние на проблема

Засега у нас няма отделен списък на фосилни находища с геоконсервационна значимост. По-известните и добре изучени фосилоносни нива са свързани с известните фосилни групи: силурски граптолити, карбонска мегафлора, юрски мекотели и брахиоподи, кредни орбитолини, корали и мекотели, терциерни нумулити и плиоценски бивалвии, гастроподи и гръбначни (Sinnyovsky, 2023b). 21 фосилни находища (фиг. 1; табл. 1) бяха включени с научни досиета в Регистъра и кадастъра на геоложките феномени в България (Jeleв, Sinnyovsky, 2003) като геотопи с научна стойност, оценени по разработената специално за регистъра обща методика (Sinnyovsky et al., 2002). Един геотоп беше оценен като глобално значим, 6 – с континентална, 4 – с регионална, 9 – с национална и 1 – с локална значимост (табл. 1).



Фиг. 1. Местоположение на фосилни геотопи, включени с досие в „Регистър и кадастър на геоложките феномени в България“

1–10 – фосилни находища на бозайници: 1–4 – при селата Ахматово, Поповица, Богданица, Селци, 5–9 – при селата Езерово, Дебър, Православен, Брягово, Драгойново, 10 – при с. Дорково, 11 – Заского (амонитно гробище при с. Гинци), 12 – Карбонска мегафлора (с. Редина), 13 – силурски граптолити (с. Реброво), 14 – Опански баир (находище на безгръбначни при с. Опанец), 15 – находище на окременени стъбла и пънове при с. Ореховица, 16 – Калето (окременени стебла при с. Ставерци), 17 – находище на мекотели при с. Санадиново, 18 – находище на коралови рифове между Ловеч и с. Изворче, 19 – находище на безгръбначни „Дрянков хълм“ при с. Пушево, 20–21 – находища на бозайници: 20 – при гр. Хаджидимово, 21 – при с. Калиманци

Таблица 1. Фосилни находища, включени с досие в „Регистър и кадастър на геоложките феномени в България“ (извадка от регистъра; Jeleв, Sinnyovsky, 2003)

№	Наименование*	Фосилна група	Значимост	Свита	Геоложка възраст
1.	Фосилни находки (Ахматово)	бозайници	глобална	Ахматовска	Горен Миоцен
2.	Фосилни находки (Поповица)	бозайници	континентална	Ахматовска	Горен Миоцен
3.	Фосилни находки (Богданица)	бозайници	континентална	Ахматовска	Горен Миоцен
4.	Фосилни находки (Селци)	бозайници	регионална	Ахматовска	Горен Миоцен
5.	Фосилни находки (Езерово)	бозайници	континентална	Ахматовска	Горен Миоцен
6.	Фосилни находки (Дебър)	бозайници	национална	Ахматовска	Горен Миоцен
7.	Фосилни находки (Православен)	бозайници	национална	Ахматовска	Горен Миоцен
8.	Фосилни находки (Брягово)	бозайници	национална	Ахматовска	Горен Миоцен
9.	Фосилни находки (Драгойново)	бозайници	локална	Ахматовска	Горен Миоцен
10.	Палеонтоложко находище (Дорково)	бозайници	континентална	Ахматовска	Горен Миоцен
11.	Заского	амонити	континентална	Гинска	Горна Юра
12.	Карбонска мегафлора	флора	континентална	Свогенска	Горен Карбон
13.	Фосилно находище на граптолити	граптолити	регионална	Салтарска и Малоречка	Силур
14.	Опански баир	безгръбначни	регионална	Опанецка	Миоцен
15.	Находище на окременени стъбла и пънове	флора	национална	Димовска	Миоцен
16.	Калето	флора	локална	Димовска	Миоцен
17.	Санадиново	мекотели	национална	Дековска	Долна Креда
18.	Ловеч–Изворче	коралови рифове	регионална	Смочанска	Долна Креда
19.	Фосилно находище „Дрянков хълм“	безгръбначни	национална	Българенска	Долна Креда
20.	Палеонтоложко находище „Хаджидимово“	бозайници	национална	Неврокопска	Миоцен
21.	Палеонтоложко находище „Калиманци“	бозайници	национална	Калиманска	Миоцен

\* Наименованията на геотопите са според „Регистър и кадастър на геоложките феномени в България“



Модифицираният вариант на методиката, предназначен за оценка на геотопи в паркова среда (Sinnyovsky, 2018), е съобразен с главните теми на проектните български геопаркове: разнообразните по тип и възраст скали в геопарк „Искърско дефиле“ (Jeleв et al., 2002; Sinnyovsky et al., 2019b), скалните пирамиди в геопарк „Белоградчишки скали“ (Sinnyovsky, 2012), алпийските ландшафти (карлинги, циркуси, морени и ледникови долини) в геопарк „Рила“ (Sinnyovsky, 2014) и морските ландшафти (стари морски тераси, лагуни и лимани) в геопарк „Бургаски езера“ (Sinnyovsky et al., 2017). Новата методика се основава на т. нар. „тематично георазнообразие“ (Sinnyovsky et al., 2019a), което акцентира върху индивидуалния подход към всеки отделен геопарк предвид неговото георазнообразие, геоморфоложки характеристики, екологични условия и социално-икономически предпоставки в контекста на геотуристическия и балнеоложки потенциал. Изисква се ясно дефинирана главна тема, върху която се гради концепцията за геопарка, и второстепенни теми допринасящи за неговото георазнообразие (Sinnyovsky, 2023b).

Разработването на най-новия проектен геопарк „Източен Балкан“ (Sinnyovsky, Stoilov, 2021) постави на дневен ред идентифицирането на фосилни находища, които стоят във фокуса на проекта. Оценката на този клас геоложки феномени по общата методика на регистъра не би била коректна, тъй като специфичните черти на фосилните находища биха останали недооценени. Създаването на специална методика е необходима не само за нуждите на българските геопаркове, но и за включването на такива геотопи в регистъра и кадастъра на геоложките феномени (Sinnyovsky, 2023b).

## Резултати

През първия етап от работата по проекта са дефинирани критерии, индикатори и параметри за количествена оценка на специфични черти на фосилни геосайтове, съставена е експертна карта за оценка на фосилни геотопи за целите на геотуризма, идентифицирани са 23 находища с висока научна и музейна стойност, като за 16 от тях са съставени научни досиета като основа на бъдещия регистър на фосилните находища в България. Подготвен е работен вариант на интерактивен портал.

### Критерии, индикатори и параметри за количествена оценка на специфични черти на фосилни геотопи

Анализирана е литературата (Gregori et al., 2005; Pereira et al., 2007; Lima et al., 2010; Brilha, 2016 и др.), посветена на някои теоретични аспекти на геоконсервацията на фосилни геотопи, както и информацията за фосилните находища с разработено досие в „Регистър и кадастър на геоложките феномени в България“. Въз основа на този анализ са подбрани критерии, индикатори и параметри за количествена оценка на специфични черти на фосилни геотопи (Sinnyovsky, 2023a). Наред със стандартните общи критерии (уникалност, представителност, честота на срещане и др.) е обърнато внимание и на информираността на обществото, наличието на представителни образци в национални и чуждестранни музейни колекции, присъствие в учебни програми.

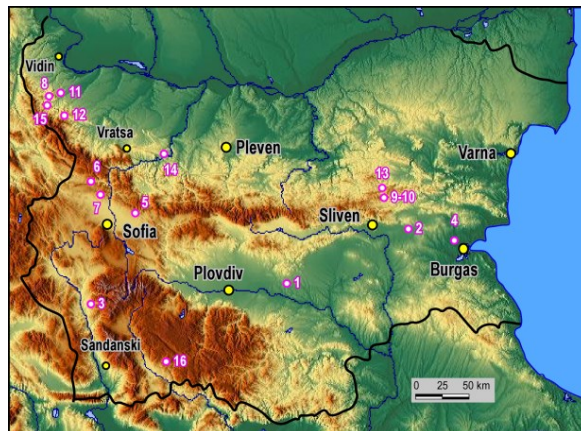
### Експертна карта за оценка на фосилни геотопи за целите на геотуризма

Експертната карта, съставена в рамките на проекта по създаването на регистъра (Sinnyovsky et al., 2002), както и тази, за оценка на геотопи в паркова среда, е подложена на критически анализ. Съставена е нова експертна карта, насочена към оценяването на фосилните геотопи от гледна точка на целите на геотуризма (Sinnyovsky, 2023b). Тя включва 14 критерия, като числовият израз на индикаторите за всеки критерий е с различна тежест – от 0 до 2, 3 или 4 в зависимост от тяхната значимост.

### Идентифициране на находища с висока научна и музейна стойност

При проведените теренни наблюдения са идентифицирани общо 23 находища с висока научна и музейна стойност (фиг. 2).

**Силурски граптолити.** Документирани са седем находища: Бухово, Церецел, Владо Тричков, Салтарски дол, Моругов дол, Мали Вучи дол и Горна Врабча (Sachanski et al., 2023). Първите четири присъстват с научни досиета в „Регистър и кадастър на геоложките феномени в България“. Във връзка с новата методика за оценка на фосилни геосайтове те са реинвентаризирани. Заедно с находището в Моругов дол, те попадат в обхвата на геопарк „Искърски пролом“. Останалите две находища (Мали Вучи дол и Горна Врабча) се описват за първи път в светлината на българската геоконсервация. С цел подчертаване на историческата стойност за българската геология, част от находищата са включени в геопътеки, носещи имената на ранните изследователи на Силурската система в България – „Разкритието на Алахверджиев“ (Бухово), „Разкритието на Хаберфелнер“ (Моругов дол), „По стъпките на Еким Бончев“ (Церецел), „Срещата на Алоис Пшибил и Христо Спасов“ (Владо Тричков).



Фиг. 2. Местоположение на фосилни геотопи със съставено научно досие за проектния регистър на фосилните находища в България

1–4 – находища на бозайници: 1 – м. Азмака, 2 – с. Венец, 3 – с. Кочериново, 4 – с. Равнец, 5–7 – находища на граптолити: 5 – гр. Бухово, 6 – Моругов дол, 7 – с. Церецел, 8 – разкритието на Toula при Белоградчик, 9 – разкритието на Toula при Котел, 10 – *Belemnites rosso* (м. Черковище, Котел), 11–12 – находища на средноюрски амонити: 11 – Белоградчик–Гара Орещец, 12 – при с. Митровци, 13 – находище на орбитолини в м. Трите вятра, Котленско, 14 – находище на иноцерамидни бивалвии при с. Кунино, 15 – Зелениград (находище на карбонска мегафлора при Белоградчик), 16 – находище на средномиоценова палеофлора при с. Сатовча

**Карбонска мегафлора.** Посетено е находището на къснокарбонска мегафлора Зелениград в района на гр. Белоградчик, където Франц Тула описва първите български растителни фосили. В настоящия проект се разглежда за първи път от гледна точка на оценката на неговия геоконсервационен потенциал. Обектът има известна културно-историческа стойност като един от най-старите въглищни рудници на Балканите със значение за средновековния поминък на населението от региона.

**Триаски криноиди, ехиниди, брахиоподи и бивалвии.** В района на Белоградчик е посетено и реинвентаризирано находището, в което Франц Тула описва и фигурира първите български фосили: триаски криноиди, ехиниди, брахиоподи и бивалвии. Заедно с находището Зелениград попада в групата на обектите с историческа стойност за българската геология.

**Карнски корали и хидрозои.** В района на град Котел, в местността Гърньовица (Sinnyovsky, Stoilov, 2022), е реинвентаризирано находището, в което Франц Тула описва карнски корали и хидрозои в триаски олистолит, внедрен сред средноюрските турбидити на Котленската олистостромна свита, които са първите описани триаски фосили от тази част на страната. Обект с висока научна стойност.

**Юрски белемнити, брахиоподи и криноиди.** В местността Черковище при гр. Котел се намира фосилно находище на брахиоподни и криноидни варовици с изключително високо съдържание на белемнити в долноюрски олистолит, внедрен сред турбидитите на средноюрската Котленска олистостромна свита (Sinnyovsky, Vangelov, 2022). Направено е предложение за литостратиграфско формализиране на термина “*Belemnitico rosso*” за червените белемнитни варовици като разпознаваем стратиграфски репер в основата на юрския разрез.

**Юрски амонити.** В Северозападна България са посетени, описани и реинвентаризирани пет средноюрски (Бат и Калов) амонитни находища: Гранитово, Белоградчик–Гара Орещец, Горно Белотинци, Превала и Митровци. Оценени са като обекти с висока научна и историческа стойност.

**Орбитолини.** В местността Трите вятра при гр. Котел Франц Тула описва добре запазени представители на кредния фораминиферен вид *Orbitolina concava* (Lamarck, 1816), типов вид на род *Orbitolina* d’Orbigny, 1850. Оттогава орбитолините са емблематични фосили за Котленския Балкан. Находището се вписва отлично в главната тема на геопарк „Източен Балкан“ – мезозойските фосилни находища.

**Иноцерамиди.** При с. Кунино е посетено и реинвентаризирано фосилно находище на къснокредни (ранномастрихтски) иноцерамидни бивалвии и редки амонитни находки, което е и холостратотипов разрез на Кунинската свита. Обект с висока научна стойност.

**Средномиоценска мегафлора.** В района на с. Сатовча е посетено и реинвентаризирано в светлината на българската геоконсервация палеофлористично находище

(Bозukov et al., 2022), съдържащо и фосили от насекоми, пера от птици и ларви на земноводни, което е оценено като обект с континентално значение.

**Късномиоценска гръбначна фауна.** От някои кариери и разкрития в района на гр. Бургас е събран нов фосилен материал: Венец (зъб от носорог, хумерус на хоботно, фаланга и зъб на хипарион, фрагменти от коруба на костенурка, антилопа), Равнец (зъб на хоботно, фрагмент от калканеус на чифтокопитно), Новоселци (фрагменти от тръбни кости, зъб от неопределен бозайник, зъб от хоботно), Ченгене скеле (неопределяеми костни фрагменти) и кв. Сарафово (фрагментирани неопределяеми кости). Част от материалите, макар оскъдни и силно фрагментирани, обогатява представата ни за фауната през късния миоцен в тази област (Bogdanova et al., 2024).

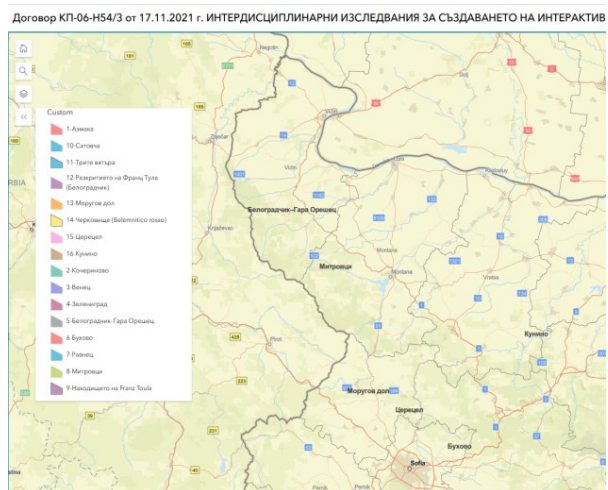
### Съставяне на научни досиета като основа на бъдещия регистър на фосилните находища в България

След извършената оценка на геоконсервационния потенциал на посочените находища са съставени научни досиета на 16 от тях: 5 на неогенска и кватернерна гръбначна фауна, 9 на силурска, триаска, юрска и къснокредна безгръбначна фауна и 2 на къснокарбонска и неогенска палеофлора (фиг. 2; табл. 2).

Въз основа на анализа на литературните източници, както и на събраните теренни данни са систематизирани данните за значимостта на фосилните находища, като основа за създаването на регистър (табл. 2).

### Интерактивен портал

За визуализирането на пространственото разположение на 16-те находища със съставено научно досие е създаден интерактивен портал в ArcGIS среда, представящ административна и геоложка информация за тях (<https://www.arcgis.com/apps/instant/basic/index.html?appid=87a34578c8ff4e7482a0b201348e0697&locale=en-us> – фиг. 3).



Фиг. 3. Екранна снимка на интерактивния портал с местоположението на фосилните находища със съставено научно досие

Таблица 2. Фосилни находища, включени с досие в проектния регистър на фосилните находища в България (извадка от регистъра)

№	Име	Фосилна група	Значимост	Стратиграфска единица	Геоложка възраст
1.	Азмака	бозайници	глобална	Ахматовска свита	Горен Миоцен (Месин)
2.	Венец	бозайници	континентална	Неподелен Неоген	Горен Миоцен
3.	Кочериново	бозайници	национална	Градищенска реперна пачка	Горен Миоцен (Долен Туролий)
4.	Равнец	бозайници	национална	Неподелен Неоген	Горен Миоцен
5.	Бухово	граптолити	национална	Малоречка свита	Силур (Лудлоу)
6.	Моругов дол	граптолити	национална	Малоречка свита	Силур (Уенлок)
7.	Церецел	граптолити	национална	Салтарска и Малоречка свита	Силур (Ландовери–Уенлок)
8.	Разкритието на Toula Белоградчик	криноиди, ехиниди, брахиоподи и бивалвии	национална	Бабинска свита	Среден Триас
9.	Находището на Franz Toula Котел	корали и хидрозои	национална	Котленска олистостромна свита	Средна Юра
10.	Черковище (Belemnitico rosso)	белемнити	национална	Котленска олистостромна свита	Средна Юра
11.	Белоградчик–Гара Орешец	амонити	континентална	Яворецка и Полатенска свита	Средна Юра (Бат–Калов)
12.	Митровци	амонити	национална	Яворецка свита	Средна Юра (Калов)
13.	Трите вятъра	орбитолини	национална	Русалска свита	Горна Креда (Ценоман)
14.	Находище при с. Кунино	иноцерамидни бивалвии	национална	Кунинска свита	Горна Креда (Мастрихт)
15.	Зелениград	палеофлора	национална	Зелениградска свита	Горен Карбон
16.	Сатовча	палеофлора	национална	Сивишка свита	Среден Миоцен

## Заклучение

Отчитайки значителния обществен интерес в редица страни към фосилните находища, екипът по проекта предлага нов за България интердисциплинарен подход при изучаването на фосилните находища като част от българското национално геолошко наследство: интегриране на традиционни геоложки (геолошко картиране, палеонтоложки, стратиграфски, биохронологички, геохронологички, микропалеонтоложки изследвания) и геоморфоложки методи в съчетание със съвременни дистанционни и геоинформационни методи и техники за идентифициране и заснемане на фосилни

находища с висока научна и музейна стойност, обработване, визуализиране и популяризиране на данни. Дефинираните критерии, индикатори и параметри за количествена оценка на специфични черти на фосилни геосайтове, както и съставената експертна карта за оценка на фосилни геотопи за целите на геотуризма, са една отлична основа за интегрирането на българското геолошко наследство в националното природно и културно наследство.

**Благодарности.** Настоящото изследване е във връзка с работата по договор КП-06-Н54/3 от 2021 г. с Фонд „Научни изследвания“, Министерство на образованието и науката на Република България.

## Литература

- Bogdanova, R., L. Hristova, V. Nikolov, S. Dalakchieva, G. N. Markov, L. Klain, N. Spassov. (2024). In search of the lost world. Paleontological field prospects in parts of eastern Bulgaria, Burgas District. – *Bull. of the Museums in Southeastern Bulgaria*, 28 (In print).
- Bozukov, V., L. Hristova, B. Ranguelov. (2022). New data on the genus *Cornus* L. (Cornaceae) in the Bulgarian Miocene flora. – *Rev. Bulg. Geol. Soc.*, 83, 3, 145–148; <https://doi.org/10.52215/rev.bgs.2022.83.3.145>.
- Brilha, J. (2016). Inventory and quantitative assessment of geosites and geodiversity sites: a review. – *Geoheritage*, 8, 2, 119–134; DOI:10.1007/s12371-014-0139-3.
- Gregori, L., L. Melelli, S. Rapicetta, A. Taramelli. (2005). The main geomorphosites in Umbria. – *Il Quaternario*, 18, 1, Special Vol., 93–101.
- Jelev, V., D. Sinnyovsky, V. Belogoushev. (2002). “Iskar Defile” Geopark in Bulgaria – ideas and problems. – *3rd European Geoparks Network Meeting (Eggenburg – Austria)*, Vol. of Abstracts, 22–23.
- Jelev, V., D. Sinnyovsky (Eds). (2003). *Register and Cadastre of the Geological Phenomena of Republic of Bulgaria. 188 files in 5 volumes*. – Ministry of Energy of the Republic of Bulgaria, National Geological Fund, report XV-1232 (In Bulgarian, English, and Russian).
- Lima, F. F., J. B. Brilha, E. Salamuni. (2010). Inventorying geological heritage in large territories: a methodological proposal applied to Brazil. – *Geoheritage*, 2, 3–4, 92–99; DOI:10.1007/s12371-010-0014-9.
- Pereira, P., D. Pereira, M. I. Gaetano Alves. (2007). Geomorphosite assessment in Montesinho Natural Park (Portugal). – *Geogr. Helvetica*, 62, 3, 159–168; DOI:10.5194/gh-62-159-2007.
- Sachanski, V., B. Valchev, D. Sachkov, G. Angelov. (2023). Silurian graptolite sites in Bulgaria: geological settings and geoconservation value. – *Geoheritage*, 15; <https://doi.org/10.1007/s12371-023-00884-z>.
- Sinnyovsky, D. (2012). Belogradchik rocks – a remarkable combination of natural, historic and cultural sites. – *Ann. Univ. Mining and Geol.*, 55, 1, 50–55 (In Bulgarian with English abstract).
- Sinnyovsky, D. (2014). Geodiversity of Rila Mountain, Bulgaria. – *Proc. XX Congress of the Carpathian-Balkan Geological Association, Tirana, Albania, 24–26 September*, p. 307.
- Sinnyovsky, D. (2018). Field Evaluation of Bulgarian Geosites and Geodiversity Sites in Areas Applying for Global Geoparks. – *Intern. Sci. Conf. “Geoparks and Modern Society”, 12–13 October 2018, Belogradchik, Book of Abstracts*, p. 49.
- Sinnyovsky, D. (2023a). Evaluation features of fossil and coastal geosites: selecting assessment criteria for geotourism purposes. – *C. R. Acad. Bulg. Sci.*, 76, 2, 247–255; <https://www.proceedings.bas.bg/index.php/cr/article/view/255/248>.
- Sinnyovsky, D. (2023b). Evaluation of fossil sites for the purposes of geotourism in Bulgaria. – *Rev. Bulg. Geol. Soc.*, 84, 2, 3–24; <https://doi.org/10.52215/rev.bgs.2023.84.2.3>. (In Bulgarian, with English abstract).
- Sinnyovsky, D., R. Stoilov. (2021). Kotel Balkan – an oasis of the East Balkan geodiversity. – *Rev. Bulg. Geol. Soc.*, 82, 3, 262–264. <https://doi.org/10.52215/rev.bgs.2021.82.3.262> (In Bulgarian with English abstract).
- Sinnyovsky, D., R. Stoilov. (2022). Toulas fossil deposit in the Garnyovitsa area near Kotel – a geosite of historical value for the Bulgarian geology. – *Rev. Bulg. Geol. Soc.*, 83, 3, 325–328; <https://doi.org/10.52215/rev.bgs.2022.83.3.325>. (In Bulgarian, with English abstract).
- Sinnyovsky, D., D. Vangelov. (2022). The “Belemnitico rosso” facies in the East Balkan – a proposal of lithostratigraphic formalization. – *Rev. Bulg. Geol. Soc.*, 83, 3, 153–156; <https://doi.org/10.52215/rev.bgs.2022.83.3.153>. (In Bulgarian, with English abstract).
- Sinnyovsky, D., V. Jelev, M. Antonov, S. Juranov, Z. Iliev, D. Vangelov, G. Ajdanlijski, P. Petrov, H. Vasilev. (2002). A method for estimation of the geological phenomena. – *II Intern. Conf. SGEM, Varna*, 25–33.
- Sinnyovsky, D., N. Kalutskova, N. Dronin, D. Sinnyovska. (2017). The geopark potential of the Burgas Lakes complex. – *J. of Mining and Geol. Sci.*, 60, 1, 57–62.
- Sinnyovsky, D., N. Kalutskova, N. Dronin, D. Sinnyovska, A. Medvedev, N. Telnova. (2019a). Concepts of geoparks establishment in Bulgaria and their geothermal resources. – *IOP Conf. Series: Earth Environ. Sci.*, 367, 012006, 1–15.
- Sinnyovsky, D., I. Pashova, A. Iliadis. (2019b). New initiative for Geopark “Iskar Canyon”. – *Rev. Bulg. Geol. Soc.*, 80, 3, 250–252 (In Bulgarian with English abstract).

## ANALYSIS OF THE EARLY ALPINE STRUCTURAL FRAMEWORK OF THE CENTRAL PART OF THE STRANDZHA ZONE

*Janko Gerdjikov, Dian Vangelov*

*Sofia University “St. Kliment Ohridski”, 1504 Sofia; e-mail: janko@gea.uni-sofia.bg*

**ABSTRACT.** A critical analysis is offered of the available geological data for one of the least studied parts of the Strandzha Zone that occupies the area between the Tundzha River and the Central Strandzha Mountains. An important part of the analysis includes the compilation of a summary map integrating 1:100 000 scale geological maps of territories on either side of the frontier. The cross-border correlation of Pre-Upper Cretaceous units is based on a synthesis of recently published geochronological data along with the results of our new field studies. This allows not only a better understanding of the geological evolution and the structure of the Strandzha Zone but also some correlations to be made between the major tectonic units of the zone in Bulgaria and Turkey. In line with previous models, an autochthon and an allochthon tectonic unit is distinguished in the study area. While in its western and southern parts of the autochthon the rocks record intensive Early Alpine metamorphism and deformation, eastward they are affected by a much weaker tectonic overprint that does not lead to obliteration of the primary fabric. The allochthonous units are characterised by specific syn-metamorphic fabric. Defining the extent of the allochthonous units emerges as the most acute tectonic problem.

**Key words:** Strandzha zone, Alpine tectonics, cross-border correlation, tectonics

### АНАЛИЗ НА РАННОАЛПИЙСКАТА СТРУКТУРНА РАМКА ЗА ЦЕНТРАЛНАТА ЧАСТ НА СТРАНДЖАНСКАТА ЗОНА

*Янко Герджиков, Диан Вангелов*

*Софийски университет „Св. Климент Охридски“, 1504 София; e-mail: janko@gea.uni-sofia.bg*

**РЕЗЮМЕ.** Направен е критичен анализ на съществуващите геоложки данни за една от най-слабо изучените части на Странджанската зона, която заема пространството между река Тунджа и Централна Странджа. Важна част от работата е компилирането на обобщена геоложка карта в М 1:100 000, включваща териториите от двете страни на държавната граница. Трансграничната корелация на до-горнокредните единици е базирана на интегриране на новите геохронологични данни, както и на теренните ни изследвания. Това позволява не само по-добро разбиране на структурата и геоложката еволюция на Странджанската зона, но и дава възможност да се направят корелации между главните тектонски единици в България и Турция. Следвайки предложените по-ранно тектонски модели и в нашата работа разграничаваме автохтонни и алохтонни единици. Западните и южните автохтонни единици запечатват интензивен алпийски метморфизъм и син-метаморфни деформации. Източните части на автохтона са практически лишени от метаморфни изменения. Алохтонните единици се характеризират със специфична синметаморфна структура. Дефинирането на точния обхват на алохтонните единици се очертава като най-сериозен тектонски проблем.

**Key words:** Странджанска зона, Алпийска тектоника, трансгранична корелация, тектоника

### Introduction

The presence of metamorphosed Mesozoic rocks in the Strandzha Zone are already known from the pioneering studies of Yanischevski (1946). Their metamorphism was caused by tectonic processes that took place during the Late Jurassic and Early Cretaceous and which were ascribed equally as part of the Cimmerian or Early Alpine orogeny (e.g. Chatalov 1990; Gerdjikov, 2005; Natal'in et al., 2016). These processes were related to the formation of the large-scale thrust structures that define the present-day tectonic frame of the Strandzha Zone (e.g. Dabovski & Savov, 1988). While these major features are more or less well documented in the eastern Strandzha, their presence and extent in the Dervent Heights and the rest of the Western Strandzha are still poorly studied. Studies on the synmetamorphic structures associated with the Early Alpine metamorphism in this area, as well as some of the neighboring tectonic zones west of it, are still missing.

The aim of this study is to provide a novel and more rational interpretation of the structural framework and geological evolution of the central part of the Strandzha Zone. The achievement of this preliminary synthesis was possible by the integration of the previously published data combined with detailed new field studies and a structural analysis. New geochronological analyses of key rock formations from the main tectonic units are envisaged in the future.

### Main geological units

The Strandzha Zone in Bulgaria includes three main tectonic units: the Sakar, the Strandzha, and the Veleka units. The subdivision was based on their lithological characteristics and different structural position during the Late Jurassic to Early Cretaceous thrusting and metamorphism (e.g. Chatalov, 1990; Gerdjikov, 2005). The Sakar unit, characterised by the presence of high-grade metamorphosed Precambrian to Triassic rocks, is the one innermost within the frame of the Alpine Balkan orogen. The Early Alpine metamorphism reached amphibolite facies conditions which are the higher most within the Strandzha Zone. Eastward, in the Strandzha unit, the Early Alpine metamorphism is less intensive and widespread. For the moment, it is impossible to put precise tectonic boundary between the Sakar and the Strandzha units. As such, it is usually assigned the Lesovo fault (Chatalov, 1965) which is detected only on the basis of sharp lithological changes across its trace (Fig. 1). The Strandzha unit is overthrust by the metamorphic rocks of the Veleka allochthon unit (e.g. Dabovski and Savov, 1988). This allochthon represents probably the least studied unit where its stratigraphy, age of the rock associations, and their metamorphic degree are still poorly constrained and under debate.



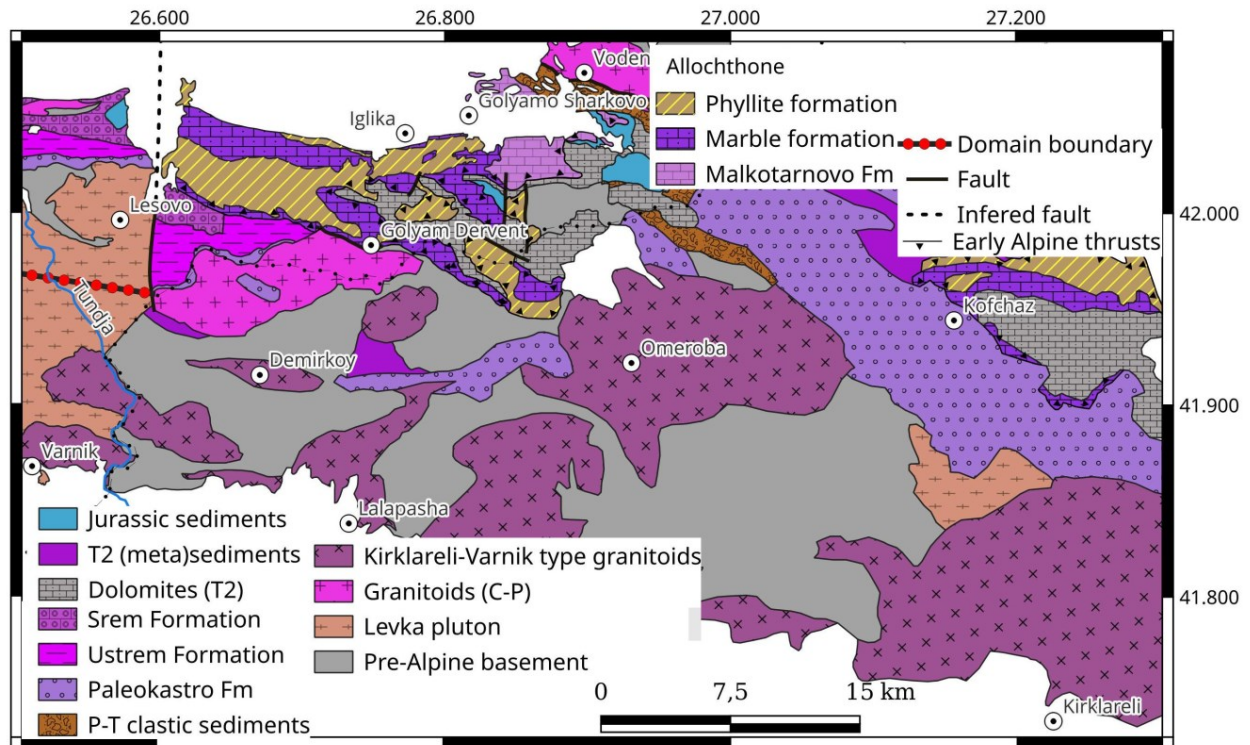


Fig. 1. Simplified geological map of the central part of the Strandzha Zone. The possible continuation of the Veleka unit to the south is speculative. Also, for the part south of the border, another speculation is the attribution of the Mesozoic units to a given stratigraphic unit that originates from Bulgarian research. The Malko Tarnovo Formation is shown as part of the allochthon, despite unclear position. An attempt was made to simplify and omit parts of the complications introduced in Dabovski et al. (1993), that are not present in the original maps at scale 1: 25 000.

### Redefinition of the autochthonous units

Four Alpine litho-tectonic entities have been identified in the study area, based on their different lithological characteristics and structural positions: the Sakar autochthon, the western Derwent autochthon, the Western Strandzha autochthon, and the Veleka allochthon.

The Sakar autochthon occupies the western part of the area (Fig. 1). The Levka pluton, also known as the Lesovo orthogneisses (Dabovski et al., 1993), which is ca. 319 Ma old, is cropping out to the south, intruded by a set of smaller bodies of K-feldspar phyrlic granites, or Varnik granites (Gerdjikov, 2005). The Varnik granites share some similar features with the well-studied Permian Kirklareli pluton in Turkey (Natal'in et al., 2016) with which they share probably a similar age. The Levka pluton intrudes the Pre-Permian high-grade basement affected by Variscan and Alpine metamorphic events (e.g. Salacińska et al., 2022). Northward, granites and their host rocks are covered by Early to Middle Triassic metasediments (Fig. 1) that can be regarded as an eastern continuation of the well-studied Triassic sequences from the Topolovgrad syncline.

The western Derwent autochthon occupies the western and central parts of the Derwent Heights. They are dominated by the large (50 km<sup>2</sup>) granitoid body of the Derwent-Hamzabeyli pluton that, unlike the neighboring Levka pluton, does not display a penetrative Alpine overprint (Gerdjikov and Metodiev, 2005). The Derwent-Hamzabeyli granite is emplaced into high-grade gneisses currently cropping out along the NE and SE periphery of the pluton (Fig. 1). While the part of the northern contact of the pluton is strongly overprinted by late brittle deformation, along its northwestern contact transpressive

Triassic metasediments are preserved (Fig. 1). Despite the poor outcrop conditions, the field data confirm these relationships and the presence of Middle Triassic sequences. It is important to be noted that the metamorphic grade of these sediments is lower than those of the Sakar autochthon and this fact corroborates well with the low-strain deformation observed in the Derwent-Hamzabeyli pluton. Thus, it could be concluded that an important change in the metamorphic grade exist across the Lesovo fault.

The western Strandzha autochthon is cropping out in the easternmost Derwent Heights and the westernmost Strandzha Mountains (east of the meridian of Golyamo Sharkovo - Fig. 1). It represents the western limb of the Central Strandzha anticline (Yanischevski, 1946), with a generally well-preserved Early Alpine structure. Here, the Triassic sequences slightly differ from these in the Sakar unit but are similar to those of eastern Strandzha. The presence of Jurassic sediments in this unit is also well-proven (Dabovski et al., 1993). The absence of metamorphic alterations is probably the most striking contrast with the Mesozoic rocks from the other autochthon units in the study area.

While well-studied and defined in the East Strandzha, there is a general problem with the definition of the boundaries and the lithological contents of the allochthonous Veleka unit in the area of the Derwent Heights. This is mostly due to the fact that the extent of the allochthon in this area was defined on the basis of paleontological findings only and not on structural data and detailed field observations (e.g. Dabovski et al., 1993). In a previous contribution by Gerdjikov and Metodiev (2005), doubts were cast on the preceding ideas proposed on the structure of the Veleka unit.

## Materials and methods

An important part of the studies presented herein is the accomplishment of a compiled map based on the integration of the existing 1:100 000 scale geological map sheets together with other available geological maps from Bulgaria and Turkey (Dabovski et al., 1993; Çağlayan and Yurtsever, 1998). The map is elaborated in the open-sourced QGIS software and is supplemented with our own data from the field studies. The field studies were carried out intermittently in the period 1998-2024. Observations of the tectonic contacts, lithological relationships, shear zones geometry, planar and linear fabric orientations are conducted in more than 300 outcrops.

## Results

### Compiled geological map

The compiled geological map integrating the results of the recently published studies from the Turkish and Bulgarian part of Strandzha Zone (e.g. Sunal et al., 2011; Natal'in et al., 2016; Salacińska et al., 2022) shows the distribution of the main lithotectonic units in the study area (Fig. 1). Often there is a good corroboration between the geological data of both sides of the border, as in some cases there is a perfect match of the geological boundaries which allows correlations to be made between the main geological features (e.g. between the Dervent and the Hamzabeyli plutons, the SW margin of the Central Strandzha batholith and the Kula pluton, the eastward continuation of the Varnik-type granites, etc.). In other cases, there are differences in the interpretation of the age and geological evolution of rock formations belonging to apparently similar geological units. Changes of the stratigraphic age of sedimentary sequences across the border were also identified. Some of these inconsistencies could be partly due to the low resolution of the geological maps of the Turkish part of the Strandzha Zone. Further field, structural, and geochronological analyses are necessary in order to solve these problems.

### The extent of the Sakar unit

In the previous studies, the Lesovo fault was conveniently designated as the eastern boundary of the Sakar autochthon (e.g. Chatalov, 1990). The existing cross-border maps and mainly the geological data from the Turkish side (Sunal et al., 2011; Elmas, 2012; Natal'in et al., 2016) give grounds for rejecting this paradigm. It is obvious that the Sakar-type basement, characterised by its high-grade Early Alpine overprint, extends eastward at least to the region of Kırklareli in Turkey (Fig. 1). This suggestion is supported also by the presence of the strip aligned in E-W direction, from the Sakar unit up to Kırklareli, which is of Late Carboniferous-Permian, most often strongly foliated, with granitoids intruding this high-grade metamorphic basement of a probable Variscan age (Fig. 1). The basement is referred to as the Zhaltichal Formation in Bulgaria (Dabovski et al., 1993) and the Tekedere Group in Turkey (Çağlayan and Yurtsever, 1998). As in the northern part of the Sakar unit in Bulgaria, north of Kırklareli (Fig. 1), the high-grade basement and granitoids are covered by strongly deformed and metamorphosed Permian to Triassic sequences (Natalin et al., 2012).

At this stage of the research, it was not possible to define the limit of the Sakar unit in the area northwest of Kırklareli. It is not clear yet whether there is a transition zone or an abrupt

contact between the rocks affected by higher- and lower-grade Early Alpine metamorphism and deformation. Some hints for a gradual transition are given by the data of Sunal et al. (2011), who suggest a lowering of the peak metamorphic temperatures in the area from the south to the north. On the other hand, in the published geological maps, there are several E-W trending faults and shear zones that can play the role of the northern limit of the Sakar unit in the Turkish part of the Strandzha Zone.

Bedi et al. (2013) interpreted the Sakar unit (their Dogankoy nappe) as occupying the uppermost tectonic position within the Strandzha Zone. For the moment, such interpretation is suggested only for the Turkish part of the unit, whereas clear structural data are still missing. On the other hand, it seems that the Sakar unit occupies the lowermost tectonic position in Bulgaria since the Sakar-type Middle Triassic marbles are tectonically overridden by Lower Jurassic non-metamorphosed sediments typical for the Strandzha unit, as in the area of the village of Melnitsa (Dabovski et al., 1993), as well as by rocks of the Veleka allochthon unit.

### Synmetamorphic Alpine fabric in the autochthonous units

Data on the synmetamorphic fabric of the studied rocks are available only for the westernmost part of the area, west of the Lesovo fault (Gerdjikov, 2005). Two structural domains can be distinguished there. The first, a compressional-transpressional domain described in the southern part of the Sakar unit, is characterised by the presence of high-grade shear zones parallel to the general trend of the regional foliation which strikes E-W and dips moderately to the SE and S. Numerous shear-sense criteria are observed, including asymmetric porphyroclasts and S-C' fabrics, all showing top-to-the-NW-N sense of shear. The structural data from Turkey indicate that this domain probably continuous to the east, whereas it is studied only in the region of Kırklareli for now (Sunal et al., 2011).

While the compressional-transpressional domain is built almost exclusively of metagranitoids and Precambrian to Paleozoic rocks, the second one, situated north of the first one (Fig. 1), includes a metamorphosed Triassic cover as well. This domain is characterised by generally north- to northeast dipping foliation and the lack of high-grade strike-slip shear zones. The lineation is less frequently developed and is plunging towards NE to N. The kinematic criteria are rarely observed and point to a top-to-the-N shearing. This is consistent with general northward decreasing of the degree of metamorphic alterations. The transition between the two domains is gradual and marked by the presence of a heterogeneously sheared volume, dominated by steep foliation, in the Carboniferous granitoids (Fig. 1).

There are no published data on the synmetamorphic fabric in the autochthonous units east of the Lesovo fault in Bulgaria. Field observations from rocks in this area, which are well defined as part of the autochthon (e.g. the western Dervent autochthone) indicate the presence of low-temperature shear zones of up to decameter-scale, which can be interpreted as related to the Alpine deformation. In any case, this part of the autochthon records lower in its intensity Alpine reworking.

### Delineation and internal synmetamorphic structure of the Veleka allochthon in the Dervent Heights

The map interpretation of the distribution of autochthonous and allochthonous rocks in the study area is still preliminary

(Fig. 1), yet based on several field trips and on a previous study of key areas around the village of Golyam Derwent (Gerdjikov and Metodiev, 2005). The main difficulties are related to the accessibility of the countryside (due to depopulation, the area of the Derwent Heights is turning overgrown and impassable) and general poor outcrop conditions. The distribution of allochthonous rocks in Turkey, presented on the map, is mostly interpretative for the time being.

As a coherent body, the allochthon is mapped west of the line connecting the villages of Golyam Derwent and Golyamo Sharkovo. In this area, its relationships with the autochthon can be observed in several outcrops and along several sections. East of this line, the situation is more complicated and allochthonous rocks occur as “patches” since their contacts are often marked by late, brittle faults. To trace the distribution of the Veleka unit in Turkey, the only available source for now is the Turkish 1:100 000 scale geological map (Çağlayan and Yurtsever, 1998). The analysis of this map indicates that north of Omeroba there is a large area built only of autochthonous rocks (Fig. 1). According to this map, allochthonous rocks occur only north of Kofchaz (Fig. 1). Thus, it appears that the outcrops of the Veleka unit in the Derwent Heights are forming a km-scale klippe, completely detached from other parts of the allochthon.

In general, the logic of Dabovski et al. (1993) is followed, and two allochthonous sheets (designated as formations) are distinguished: lower – marble dominated, and upper – phyllite dominated. It must be noted that this superposition is rarely obvious, as probably the best arguments for this are from the area NW and W of Golyam Derwent (Gerdjikov and Metodiev, 2005).

Unlike the autochthon, the Phyllite and Marble formations display strong mylonitic fabric. The constituent rocks (phyllites, marbles, and calc-schists) are strongly foliated and stretching lineation is often observed. In the areas where coherent sections of the allochthon could be observed (e.g. NW of Golyam Derwent, S of Golyamo Sharkovo and Igljika), foliation trends ESE-WNW to E-W and the lineation is plunging either to WNW or ESE. Different scale coaxial folds with axes trending parallel to the lineations were observed.

#### The problem of distinction between the autochthonous and allochthonous units

The absence of clear field evidence for the existence of a discrete thrust boundary between the autochthon and the allochthon has made their distinction on the field very difficult. Therefore, this boundary could be defined in the study area only on the basis of the differences in the lithological and metamorphic characteristics. Unfortunately, this is not an easy task and straightforward conclusions are often difficult to be made. Although the lithological associations of the allochthon in the Derwent Heights are relatively well defined, their distinction from apparently lithologically similar units from the autochthon is very difficult. This is the case, for example, with the Phyllite and Marble formations due to the existence of the same lithologies in the neighboring units. After numerous field trips and detailed mapping in the study area, the allochthon position of the Phyllite formation could be affirmed with certainty only in the area northwest of the village of Golyam Derwent (Gerdjikov and Metodiev, 2005).

Another possibility to distinguish the lithologically similar units from the autochthon and the allochthon is comparisons of

their style of deformation and degree of metamorphism. This demands detailed structural studies of the rocks from the study area to be made. All synmetamorphic features (S and L fabrics, and folds) of the Phyllite and Marble formations in the Derwent Highs Heights show characteristics and orientations similar to those from the allochthonous units in the eastern part of the Strandzha Zone (work in preparation).

#### Concluding remarks

Studies in the central part of the Strandzha Zone put in evidence the existence of three autochthonous units and an allochthonous unit consisting of Phyllite and Marble formations, which is related to the Early Alpine orogeny. The intensity of the Early Alpine metamorphism and deformation in the autochthon clearly decrease eastward from the Sakar to the Western Strandzha unit. Structural observations from the allochthon in the Derwent Heights show clear similarities of their deformation style and structural position with the rocks from the Veleka allochthon unit in the Eastern Strandzha.

Finally, this study demonstrates that even simple attempts for cross-border correlations based mostly on the compilation of different geological maps from Bulgaria and Turkey can be highly beneficial for the creation of a meaningful tectonic synthesis.

#### Acknowledgements.

This study was supported by the Bulgarian National Science Fund under grant KP – 06-N74/1. The authors are grateful to the reviewers for their constructive comments that helped to improve the manuscript. The authors are also grateful to Nikolay Gospodinov for his logistic support.

#### References

- Bedi, Y., Vasilev, E., Dabovski, C., Ergen, A., Okuyucu, C., Dogan, A., TEKIN, U.K., Ivanova, D., Boncheva, I., Lakova, I., Sachanski, V. (2013). New age data from the tectonostratigraphic units of the Istranca Massif in NW Turkey: a correlation with SE Bulgaria. *Geol. Carpathica* 64 (4), 255–277.
- Çağlayan, M. A., & Yurtsever, A. (1998). *Geological Map of Turkey 1:100,000 scale, no. 20, 21, 22, 23, Burgaz-A3, Edirne-B2 and B3, Burgaz-A4 and Kırklareli-B4; Kırklareli-B5 and B6; Kırklareli-C6 Sheets*. Ankara, Mineral Research and Exploration Institute (MTA) of Turkey.
- Chatalov, G. (1965). New tectonic structures in the area between the Sakar and the Strandzha mountains. *Comptes Rendus de l'Academie Bulgare Des Sciences*, 18, 861–864.
- Chatalov, G. (1990). *Geology of the Strandzha zone in Bulgaria* (pp. 1–263). Publ. House Bulg. Acad. Sci.
- Dabovski, C., Savov, S., Chatalov, G., & Shilyafov, G. (1993). *Explanatory note to the geological map of Bulgaria in scale 1:100,000. Map sheet “Edirne”*. Geology and Geophysics Co, Sofia [in Bulgarian].
- Dabovski, H., & Savov, S. S. (1988). Structural studies in the nappes of Southeast Strandza. *Geologica Balcanica*, 18, 19–36.
- Elmas, A. (2012). Basement types of the Thrace Basin and a new approach to the Pre-Eocene tectonic evolution of the northeastern Aegean and northwestern Anatolia: A review of data and concepts. *International Journal of Earth*

- Sciences, 101(7), 1895–1911.  
<https://doi.org/10.1007/s00531-012-0756-5>
- Gerdjikov, I. (2005). Alpine metamorphism and granitoid magmatism in the Strandzha zone: New data from the Sakar unit, SE Bulgaria. *Turkish Journal of Earth Science*, 14, 167–183.
- Gerdjikov, I., & Metodiev, D. (2005). Thrust tectonics in the Strandzha zone: New data from the Derwent Heights, SE Bulgaria. *Ann. Univ. Mining and Geol., Geol. Geophys*, 48, 1, 41–46 [in Bulgarian].
- Natal'in, B. A., Sunal, G., Gün, E., Wang, B., & Zhiqing, Y. (2016). Precambrian to Early Cretaceous rocks of the Strandzha Massif (northwestern Turkey): Evolution of a long lasting magmatic arc. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 53(11), 1312–1335. <https://doi.org/10.1139/cjes-2016-0026>
- Natalin, B., Sunal, G., Satir, M., & Toraman, E. (2012). Tectonics of the Strandzha Massif, NW Turkey: History of a Long-Lived Arc at the Northern Margin of Palaeo-Tethys. *Turkish Journal of Earth Sciences*. <https://doi.org/10.3906/yer-1006-29>
- Sałacińska, A., Gerdjikov, I., Kounov, A., Chew, D., Szopa, K., Gumsley, A., et al. (2022). Variscan magmatic evolution of the Strandzha Zone (Southeast Bulgaria and Northwest Turkey) and its relationship to other North Gondwanan margin terranes. *Gondwana Research*. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2022.04.013>
- Sunal, G., Satir, M., Natal'in, B. A., Topuz, G., & Vonderschmidt, O. (2011). Metamorphism and diachronous cooling in a contractional orogen: The Strandzha Massif, NW Turkey. *Geological Magazine*, 148(4), 580–596. <https://doi.org/10.1017/S0016756810001020>
- Yanischevski, A. (1946). Aperçu abregé sur la Geologie de la montagne Strandzha dans le Bulgarie de sud-est. *Geologie de la Bulgarie. Annuaire de la Direction pour recherches Geologiques, Ser. A*, 4, 380–389 [in Bulgarian].

## THICKNESS OF THE AGGRADATIONAL MARINE SEDIMENTS ON THE BULGARIAN BLACK SEA COAST, NEAR SUNNY BEACH, DEPOSITED AFTER THE YOUNGER DRYAS, BASED ON EXPLORATION DRILLING

Ivan D. Ivanov, Dimitar Sachkov

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia, Bulgaria; E-mail: Ivan.D.Ivanov@mgu.bg, Dimitar.Sachkov@mgu.bg

**ABSTRACT.** It is believed that after the sharp decline and rise of the Black Sea level between 9000 to 7000 years ago (BP), corresponding to the effects of the Younger Dryas cooling phase, the Black Sea was connected with the level of the World Ocean and moved more or less in accordance with it. However, a New Chernomorian transgression is recorded on the Black Sea shores reaching 4-5 m above present sea level (p.s.l.) in the period 5600–4300 BP (Bronze age), followed by the Fanagorian regression, starting around 2500 BP, that is believed to have dropped to 3 m. below p.s.l. Both indicate significant sea level oscillations. If the archaeological data are considered, it is evident that numerous Eneolithic (6800 – 5800 BP) and Early Bronze Age (5600 – 4400 BP) human settlements are now under 6-10 m of water; thus, confusion arises as to the accuracy and completeness of the data published on the sea level. Recent industrial sand exploration project in the Sunny Beach resort, in the Municipality of Necebar, has provided data about the thickness of the aggradation marine sand package deposited on top of a thick compacted clay strata, interpreted to represent the Younger Dryas dry land (approximately 7000 BP) that was subjected to transgressive sedimentation. This thickness of transgressive sediments is 12.5 m found in two boreholes and corresponds to the total Black Sea level rise as inferred by Genov (2016). The drilling has not provided reliable data on local transgression or regression events, but rather is indicative of constant sea level rise, which more or less corroborates with the archaeological data.

**Key words:** Black Sea level, Younger Dryas, biblical flood, terraces, transgression

### ДЕБЕЛИНА НА МОРСКИЯ АГРАДАЦИОНЕН ПАКЕТ, ОТЛОЖЕН СЛЕД МЛАДИЯ ДРИАС В СЕКТОРА НА СЛЪНЧЕВ БРЯГ НА БЪЛГАРСКАТА ЧЕРНОМОРСКА ИВИЦА, ПО ДАННИ ОТ ПРОУЧВАТЕЛНО СОНДИРАНЕ

Иван Д. Иванов, Димитър Съчков

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

**РЕЗЮМЕ.** След бързото спадане на черноморското ниво в интервала 9000 до 7000 преди настоящето (BP), в резултат на застудяването през Младия Дриас се смята, че то се е изравнило с това на Световния океан и се е движило повече или по-малко синхронно със световното морско ниво. Само че по черноморското крайбрежие има данни за Новочерноморска трансгресия, достигнала 4-5 m над настоящето морско ниво (p.s.l.) в периода 5600–4300 BP (Бронзова епоха), последвана от Фанагорийската регресия, започнала около 2500 BP, когато морското ниво спада до 3 m под p.s.l., като и двете указват за значителни осцилации на нивото. Ако се анализират данните от морската археология се вижда, че има значителен брой енеолитни (6800 – 5800 BP) и ранно бронзови селища (5600 – 4400 BP), които сега се намират на дълбочина между 6-10 m под съвременното морско ниво, което засилва объркването относно точността и пълнотата на данните за черноморското ниво. Неотдавнашни геологопроучвателни работи на морски пясъци в курорта Слънчев бряг, община Несебър, добавиха данни за дебелината на аградационния пакет, отложен върху уплътнени глинести наслаги, интерпретирани като Младо дриаска сухоземна подложка (приблизително 7000 BP), която е била подложена на трансгресивна седиментация. Дебелината на трансгресивните седименти е 12,5 m в два сондажа и напълно отговора на общата величина на издигането на черноморското ниво според Genov (2016). Сондирането не предостави надеждни данни за локални трансгресивни или регресивни събития, а по-скоро указва за постоянно покачване на нивото, което повече или по-малко се потвърждава от археоложките данни.

**Ключови думи:** черноморско ниво, Млад Дриас, библейски потоп, тераси, трансгресия

### Въведение

В тази публикация се представят резултати от промишлено проучване на пясъци с морски произход в лиманната част на долината на река Хаджийска в община Несебър (Фиг. 1). Лиманът на р. Хаджийска заема площ от около 19.2 km<sup>2</sup> (Попов и Мишев, 1974). Дължината му е 54.7 km, а максималната му ширина около 4.9 km. Целта на проучването бе да установи дебелината и литоложкия състав на теригенните седименти в терасната заравненост на лимана с оглед на тяхното използване за производство на бетонни смеси. При сондажното проучване в долното течение на река Хаджийска се получиха интересни резултати, свързани с цялостната еволюция на черноморското ни крайбрежие през Холоцена. В тази публикация е направен опит да се обвържат резултатите от това проучване с известните научни данни за еволюцията на Черноморското крайбрежие през Холоцена.



Фиг. 1. Обзорна карта на района на находището.

### Геолого-тектонска характеристика на района на изследване

Първото по-подробно изясняване на геоложкия строеж и тектониката на приморската част на Източна Стара



планина между реките Фандъклийска и Хаджийска е направено в труда на Ботев и др. (1967).

Литоложният строеж на Старопланинската зона определя минералния състав на плажната ивица на старопланинското крайбрежие. Основният компонент на тази ивица са кварцовите пясъци, които са получени в резултат на ерозия и абразия на кварц - съдържащият Емински флиш, както и на разнообразни горнокредни вулканити разположени на юг от Просенишкият грабен.

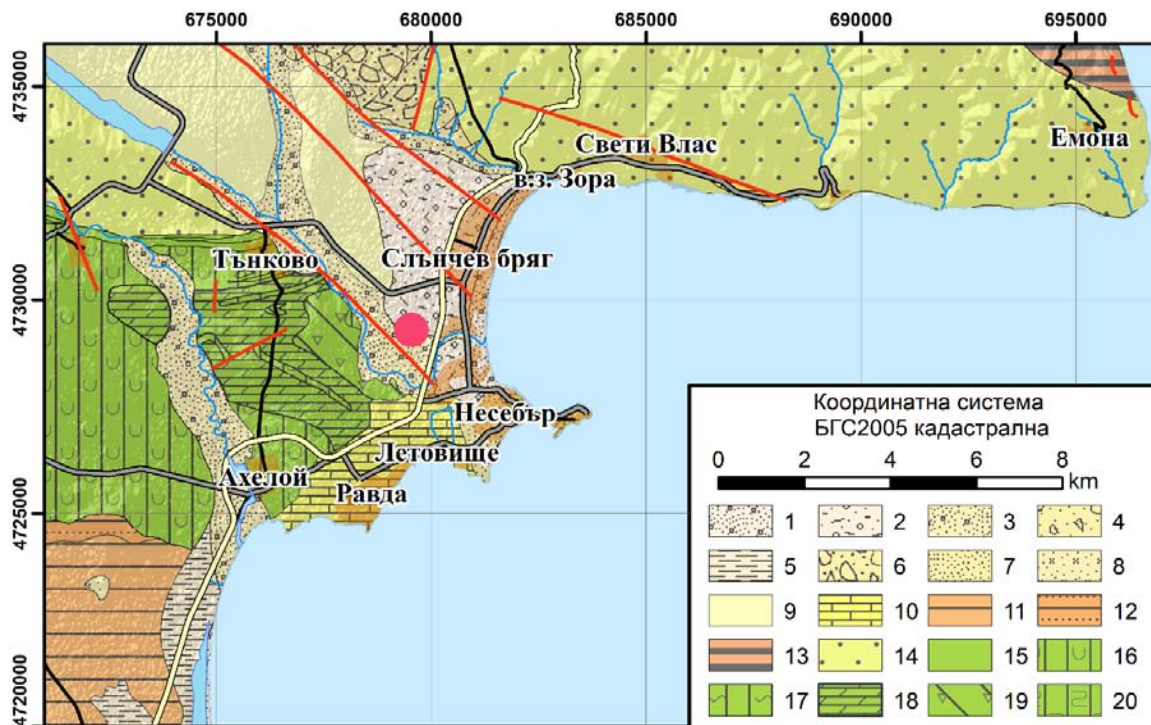
Просенишкият грабен (Фиг. 2) е разположен южно от Подбалканския дълбочинен разлом. Река Хаджийска тече през този грабен. От север и от юг в издигнатите блокове на грабена се разкрива Емински флиш и в по-малка степен вулканити от Медовската и Драгановската свита (Фиг. 3). Долината на р. Хаджийска е всечена в мощни холоценски седименти, свързани с лиманното седиментообразуване.

Основният тектонски фактор, формиращ седиментацията в Просенишкият грабен и долината на река Хаджийска, е Подбалканският разлом, който ограничава грабена от север и е маркиран от

поредица от наносни конуси. Съществуването на този разлом в изследваната област е неоспоримо, но значението и обхватът му на запад от тази област са предмет на разнообразни интерпретации, които не са предмет на тази публикация.



Фиг. 2. Тектонска схема на изследвания район. 1 – Източнобалканска Т3, 2 – Средногорска Т3, 3 – Просенишки грабен, 4 – Крипторазлом, 5 – Разсед (установен), 6 – Разсед (предполагам), 7 – Възсед, 8 – Ос на антиклинала (1 – Ираклийска, 2 – Еминска и 3 – Медовска) и 9 – Ос на синклинала, по Кънчев и Герчева (1992).



Фиг. 3. Геоложка карта на изследвания район, по данни на Кънчев и Герчева (1992, 1995) и Петрова и др. (1992 и 1994) с допълнения. 1 - Съвременни морски образувания - плажни пясъци; 2 - Морски образувания на ниската тераса - пясъци и чакъли; 3 - Алувиални образувания (русови и на заливните тераси) - чакъли, пясъци, глини, алувиален лъс; 4 - Пролувиално-делувиални образувания - слабо обработени пясъци, чакъли и валуни; 5 - Езерно-блатни образувания - пясъци, глини и торф; 6 - Пролувиални образувания (наносни конуси) – чакъли и пясъци; 7 - Еолични образувания – пясъци; 8 - Морски образувания на високата (Карангатска) тераса – пясъци; 9 - Континентални образувания - чакъли, пясъци и глини; 10 - Одръска свита - черупчести и оолитни варовици и пясъчници; 11 - Мургиска свита - мергели, глини, пясъци и варовици; 12 - Равнецка свита - конгломерати, пясъчници, глини, въглища и въглищни шисти; 13 - Глинесто-теригенна задруга - флиш-алтернация на глинести мергели, алевролити и пясъчници; 14 - Еминска флишка свита - флиш-алтернация на мергели, алевролити, пясъчници и варовици; 15 - Драгановска свита – туфи, туфити, варовици и мергели; 16 - Медовска свита – туфи; 17 - Медовска свита - алкални базалтоиди (разливи и силове); 18 - Тънковска свита - алтернация на глинести варовици, туфити и туфи; 19 - Тънковска свита - алкални базалтоиди (разливи и силове); 20 - Тънковска свита - алкални трахити (разливи и силове); с червени линии – неопределени тектонски нарушения.

Тектонският блок южно от Подбалканският разлом по пътя. Попов и Мишев, (1974) цитират геодезично

установени стойности от – 1,46 mm за година при с. Орizare. Съгласно горните автори неравномерното

потъване на земната кора в обсега на Бургаската низина е отразено в асиметрията на водосборите от приморската част на Черноморските реки. Левият водосбор на р. Хаджийска е 4 пъти по-голям от десния. А десният водосбор на р. Ахелой е 2 пъти по-голям от левия. За асиметрията на долинните водосбори на двете реки, съществена роля играят именно разломите.

## Характер на акумулираните наслаги в района на Слънчев Бряг

Река Хаджийска допринася за формирането на плажа на Слънчев бряг на север и плажа на Несебър на юг от ѝ. Плажът на Слънчев бряг е с дължина 5500 m и е изграден от преимуществено кварцов пясък. Карбонатното съдържание в пясъка на този плаж намалява от север на юг. При устието на р. Хаджийска то е 0.38% по дюнните в южната му част. Съдържанието на кварц е свързано с близостта на Еминският флиш, който се намира северно от Подбалканския разлом (Попов, Мишев, 1974).

Несебърската плажна ивица е с дължина 1400 m и е изградена от пясък с карбонатно съдържание, което не надвишава 2% и има съдържание на тежки минерали до около 3%.

Като цяло може да се заключи, че ниската приморска част на долината на р. Хаджийска е благоприятна за отлагане на пясъци с ниско съдържание на карбонати и високо съдържание на кварц поради наличието на подхранване от вулканитите.

Също така, от значение е и това, че в района има силни северни и североизточни ветрове, което е отразено в дюнния релеф на плажа.

При сондажните проучвания по време на строителството на Слънчев бряг, цитирани от Попов и Мишев (1974) е установено, че пясъчният слой има дебелина до 25 m. Установени са три торфени слоя на 4-5 m., на 10 до 12,5 m и на 20-22 m.

Очевидно споменатите по-горе торфени интервали не са развити равномерно и непрекъснато върху цялата област в терасата на р. Хаджийска, като очевидно между тях има латерално зацепване, изклонване и/или формиране на лещи с преобладаващо торфен, пясъчников или детритно-карбонатен състав.

Детритно-карбонатните отложения са морски по произход и са свързани с пясъчниковите отложения, като отразяват различна дълбочина на морската вода и различна прибрежна хидродинамика.

Указаната от Попов и Мишев (1974) стратиграфска последователност за Слънчев бряг частично послужи като мотивация за настоящото изследване, за да се направи опит да се увеличат промишлените запаси в дълбочина до около 22-25 m в находище “Инджейско блато”. Този опит не се увенча с успех поради факта, че при сондирането достигнахме до дебел глинест пакет на дълбочина около 12,5 m в три сондажа. Третият сондаж бе прокаран умишлено в съвременен техногенен насип с дебелина 12 m, като в дълбочина също се намериха тези глини като в първите два сондажа.

В действителност, тази находка напълно отговоря на общата очаквана дебелина на седиментите, отложени след Черноморският етап - T1 (7000 години по радиовъглеродната скала) (Genov, 2016), т.е. след

предложенията от Ryan, et al. (1997) библейски потоп (Chepalyga, 2007).

От друга страна, съществува и тектонско влияние, което, ако отчетем цитираното от Попов и Мишев потъване от 1,4-1,5 m за година при с. Орizare, се равнява на общо потъване от 11-12 m за Просенишкият грабен за периода от около 7000 г. до съвременността, т.е. след “потопа” предложен от Ryan et al. (1997). Ако приемем такава дълбочина на тектонско пропадане на грабена, излиза че изобщо не е необходимо да има евстатично покачване на нивото на Черно Море през последните 7000 г., тъй като 12 метра дебелина на морските седименти може да се постигне само по тектонски причини.

В допълнение на това, съществува и геоморфоложки фактор, изразяващ се в ерозионната роля на самата река, която вероятно е издълбала тесен ерозионен канал – каньон или ждрело, врязан в терасовидна част, която понастоящем е погребана под 12-13 m морски пясъчни наслаги.

## Геоморфоложки рисунок на крайбрежната зона по морски тераси

Релефът във високата част на планината, северно от Подбалканския разлом, се определя от староплиоценската – понтийска заравнена повърхнина. В източната част на Еминска Стара планина тя срязва Еминския флиш и придава на планинското било, по цялата му протежение, плоско-заравнен характер. Откъм долината на р. Хаджийска, заравнеността е разсечена от разседни откоси с височина 300-350 m, свързани с горноплиоценската и плеистоценска активизация на Подбалканския разлом. Под понтийската заравненост крайбрежната ивица се определя морфоложки от черноморските тераси, като за територията на България са установени следните морски терасни заравнености (Попов, Мишев, 1974), които в голяма степен са възприети от работите на Федоров (Федоров и др. 1962; Федоров, 1963; Лилиенберг и др. 1964):

1. Долно плеистоценска – Старочаудинска – с относителна височина 110-120 m;
2. Младочаудинска - 85-100 m относителна височина;
3. Средно плеистоценска – Староевксинска – 50-60 m;
4. Евксинско - Узунларска – 45-45 m;
5. Горноплеистоценска – Старокарангатска – 20-25 m;
6. Младокарангатска – 8-9 m;
7. Холоценска Новочерноморска- 4-5 m;
8. Нимфейска – 1.5-2 m.

Блатната заравненост в долината на р. Хаджийска, където се намира находище “Инджейско блато”, отговаря по височина на Нимфейската тераса. Нимфейската тераса е резултат на аградивна (трансгресивна) морска дейност, свързана с минимално покачване на морското ниво и, по тази причина, покривката на тази тераса е глинесто-аккумуляционна. Добивните работи в пясъчната кариера потвърждават нейната дебелина от 1,5-2 m. Съвременен прочит на последните морски флукуации е представен в

работитите на Синьовски и др. (2019) и Sinnyovsky (2020 а и b).

През Холоцена – геоложкият период, който се отделя след последният ледников максимум на Вюрма, известен като Дриас, има общо покачване на морското ниво в целият свят, но това покачване се характеризира с флукутации, изразяващи се в понижаване и повишаване на нивото. Флукуациите са с продължителност стотици и хиляди години. Може да се допусне, че тези именно флукутации водят до формирането на Новочерноморската и Нимфейската морски тераси. Тези флукутации са причина за наводняването на праисторическите жилища, вкопани в бреговата ивица при Яйлата, както и много други подобни феномени. Основният, нерешен досега проблем, е доколко тези флукутации са локални, тоест свързани с наслагване на тектонски фактори и доколко те са регионални за Черноморският регион, т.е. отразяват цялостни климатични процеси характерни за Черно море и Световният океан като цяло.

### Морски флукутации и значението им за дебелината на пясъчните наслаги

Холоценските флукутации на морското ниво са добре изучени по украинското и руското крайбрежие, където са идентифицирани отчетливо две трансгресии (повишаване на нивото) и една регресия (понижаване на нивото) (Синьовски, 2021). Особено значими са флукуациите през Дриаса. Младият Дриас е микро-ледников период в Европа, който се установява преди около 12500 години, като в него се съдържа климатичната граница между Плейстоцена и Холоцена, която се приема да е на около 11260 - 11700 години назад във времето (различните автори дават различна цифра).

През това застудяване нивото на Черно море спада с около 90 m. (Slavova, 2009 и др.), като се формират морски тераси, които сега са под морското ниво. През този период площта на “Хаджийско блато” очевидно е била високо над морското ниво, а в долината на р. Хаджийска се е извършвала интензивна ерозионна дейност за да се приспособи ерозионният базис към морското ниво.

Преди около 9500 – 7000 г. в Черно море се проявява мощна регресия, която се дължи на силното застудяване през младият Дриас. Тази регресия според някои учени се прекратява от катастрофално повдигане на нивото на Черно море съответстващо на Ноевия потоп 7.2 хил. г. BP (Ryan et al. 1997) или 8.4 хил. г. BP (Ryan et al. 2003).

Преди потопа (трансгресията на Ryan, 1997 и 2003) морето е имало характер на соленоводно езеро, поради факта, че морското ниво на Черно море е спаднало под Босфорският праг и дори под Дарданелският праг, така че средиземноморска вода не е постъпвала. Очевидно през този период морско седиментоотлагане в долината на р. Хаджийска не е протичало (Genov, 2016).

Самата ранно холоценска (Дриаска) регресия не е била равномерна, като се установяват два мини-гляциални пика: първият преди около 9500 г., а вторият пик на мини-гляциалната дейност между 8200–7800 г. Тези пикове съвпадат с периоди на понижена слънчева активност.

След стабилизирането на високо морско ниво преди около 7000 г., т.е., след потопа, се проявява Новочерноморската трансгресия (Федоров, 1956), която

достига своя максимум от 4–5 m над съвременното ниво преди 5600–4300 г. (Бронзовата епоха). Т.е. през бронзовата епоха морското ниво е било високо, като е формирана Новочерноморската тераса, съответстваща на това ниво, която е добре изразена по Странджанското крайбрежие (Федоров и др. 1962), но и на други места по българското крайбрежие.

Същевременно е доказано съществуването на многобройни населени места под водата на българското крайбрежие на дълбочина под 10 m с възраст енеолит (6800 – 5800 BP) и ранна бронзова епоха (5600 – 4400 BP) (Peev et al. 2020). Преобладаващата дълбочина на морето, на която сега се намират и енеолитните и ранно-бронзовите селища е между 6 и 8 m.

Важно е да се отбележи, че тези поселения се датират след бързото покачване на нивото, което според Ryan et al. (1997 и 2003) е преди около 7-8 хил. г.

Тук възниква очевиден проблем, тъй като не е възможно да има селища на дълбочина 6-8 m под морското ниво и същевременно нивото на морето да е 4 m по-високо от сегашното и да формира Новочерноморската тераса.

Проблемът може да се реши ако се приеме, че възрастите на цитираните явления се преливат във времето, не са точно установени, т.е. тяхното начало и край не са точно установени и в действителност флукуациите на морското ниво след потопа са по-чести отколкото се приема. Също така, локални тектонски обстановки задължително са играли роля.

Тектонският фактор замаскира степента, в която пясъчните седименти в долината на р. Хаджийска са свързани с Новочерноморската трансгресия.

Преди около 4100 г. морското ниво съвпада приблизително с днешното, а преди 2500 г. започва Фанагорийската регресия (Федоров, 1956), която предизвиква спад до 3 m под съвременното морско ниво.

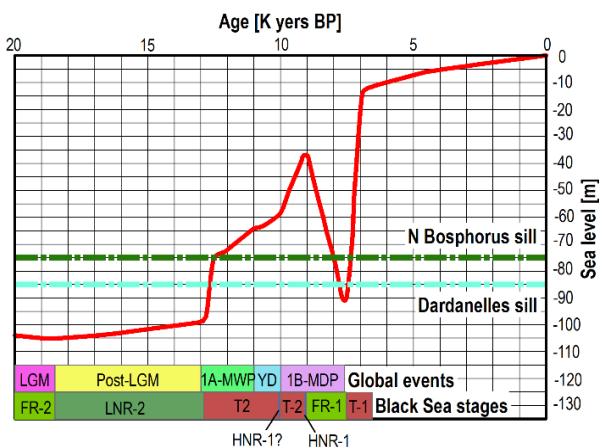
Предполагаме, че тази регресия води до частична ерозия, която по-късно е компенсирана от тинести отлагания, формиращи „откривката“ на “Хаджийско блато”. Представата за фанагорийският регресивен – трансгресивен цикъл (Дикарев, 2011) води началото си от работата на Федоров (1963), като целта е била да се обясни съществуването на Гръцки колонии от първото хилядолетие BC в така нареченият Кимерски Босфор - Фанагория, които се намират под вода сега на дълбочина 5-6 m.

Последните океанографски изследвания, обаче, сочат, че след 7500 години (предполагаема осреднена възраст на морската инвазия) нивата на Черно море и Световния океан са свързани и предполагат едновременно понижение и повишение (Fauache et al. 2012), което поставя под въпрос Фанагорийският цикъл.

След VI в. започва последната в историята на Земята трансгресия, наречена Нимфейска (Федоров, 1959), когато морското ниво отново се повишава и преди около 1000 г. достига до 1,5–2,0 m над съвременното – Нимфейска тераса .

Обосновано описание на черноморските флукутации се дава от Genov (2016). Извадка от неговото представяне на проблема може да бъде видяна на фиг. 4, която показва основната фактология по този въпрос. На същата фигура, регресията през младия Дриас е показана като дълбоко връзване на нивото на Черно море, което преминава в

рязко покачване между 8000 и 7000 г. BP, съответстващо на „потопа“ (Ryan et al., 1997 и 2003).



Фиг. 4. Крива на морското ниво на Черно море, по данни на Genov (2016).

След края на „потопа“, нивото на морето се изменя повече или по-малко равномерно. Морските тераси всъщност отразяват периоди на по-дълъг стоене на едно ниво. Реално Фанагорийската регресия и Новочерноморската трансгресия се компенсират дори и да ги е имало, като това е изразено в промяна на наклона на кривата на нарастване на нивото показана от Genov (2016).

От кривата на флукуациите на морското ниво следва, че отлагането на пясъците в Хаджийско блато не е възможно до около 7000 г. назад във времето, поради много интензивна ерозия.

Изглежда целият пясъчен пакет в находище „Инджейско блато“ е отложен след последните 7000 години. Покачването на морското ниво през този период е около 13-14 m според Genov (2016). Същевременно дебелината на пакета от морски пясъци, установен чрез настоящото сондиране в „Инджейско блато“, е около 12-13 m, и отговаря на общата височина на нарастването на нивото на морето след Младия Дриас.

### Интерпретация на сондажните данни от настоящото проучване

При настоящото проучване бяха изпълнени следните сондажи:

- С-2301 – продуктивен, прокаран в девствен терен. Продуктивният интервал е от 3,2 до 12 m, като съдържа пясъци с глинести лещи и черупки, след което до дълбочина 20 m следва уплътнена глина с черупки;
- С-2302 – продуктивен интервал от 2,5 до 12,5 m, който съдържа пясък с черупки и отделни глинести прослойки, след което до 20 m следва уплътнена глина с единични черупки;
- С-2303 – Сондажът е прокаран в насип с дебелина 12 m, за да се установи какво има под насипа. Под насипа в интервала 12-20 m има само уплътнена глина, подобна на тази от другите сондажи.

Горните наблюдения показват, че:

- дебелината на откривката достига до около 2,5 m, но е променлива,

- пясъкът е морски по произход;
- след 12,5 m има дебел интервал от уплътнена глина и редки черупки.

Преминаването през интервала под 12,5 m е икономически нерентабилно и следователно дебелината на продуктивния промишлен пласт не превишава 12,5 m. Същевременно вътре в продуктивния пласт се установява голямо количество черупки (Фиг. 5) и сравнително тънки, но повсеместно разпространени глинести прослойки.



Фиг. 5. Черупки в сондажна ядка от сондаж С-2302. Поради факта, че теренът е пясъчен и слабо споен след изваждане на повърхността ядката много бързо се разпада.

В уплътнената глина (Фиг. 6), след 12,5 m също има черупки и тя очевидно е морска или смесена по произход, но тя се явява подложка на трансгресивната последователност от пясък с черупки и е възможно да е много по-стара, т.е. да е отложена в до Вюрмски периоди на Кватернера. При всички случаи, дълбокото връзване през младия Дриас е извело тези стари глинести наслаги далеч над морското ниво, като те са погребани отново от морски наслаги през последните 7000 години от трансгресивните наноси след така наречения „потоп“, който, съгласно натрупването от научни изследвания, е реален, но е протекъл достатъчно бавно – поне за период от около 1000 г.



Фиг. 6. Уплътнена глина от сондаж С-2301, метър 14. В глината се разпознават късове от горнокредни вулканити и кварцови жили.

### Изводи

Горните съображения налагат следните изводи:

1. Въз основа на анализа на морските флукуации, рационално очакваната дебелина на пясъчните седименти в Хаджийско блато е 12-14 m, защото толкова се е



покачило морското ниво след последното радикално понижаване на нивото на Черно море през младия Дриас.

2. В долината на р. Хаджика, в района на Слънчев бряг, най-вероятно съществува дълбоко врязан долинен канал, който не е подсечен от нашите сондажни работи. Т.е. подложката на кватернера не е достигната. Такъв дълбок канал очевидно е необходим за да се приспособи ерозионният базис на реката към черноморското ниво през младия Дриас и Вюрма.

4. Пясъците са морски, плажни и плитко-подводни отложения;

5. Върху морските пясъци са наложени локални малки регресии и трансгресии, свързани с отлагане на глинесто-торфени пластове в късната бронзова епоха, когато морското ниво е било близко до съвременното, което обяснява наличието на глинесто ниво на средна дълбочина 4-5 m в Слънчев бряг.

6. Съвременната пепелно-глинеста покривка е Нимфейска.

7. Макар, че горните съображения указват, че е възможно да има пясъчни лещи и в дълбочина, то те най-вероятно са привързани към тесен каньон на речната долина и не представляват устойчив икономически интерес.

8. В регионален мащаб, за Черноморския басейн наличните научни изследвания не отчитат локалните тектонски флукуации и затова не обясняват добре движенията на черноморското ниво от началото на Холоцена до сега. Изследваният район не прави изключение, при това този район е кандидат за най-силните възможни тектонски въздействия.

## Литература

- Ботев Б. и др. 1966. Геология на приморската част на Източна Стара планина. годишник на ВМГУ, XII, св. II.
- Дикарев В.А. 2011. О Фанагорийской регресии Черного моря. Вестн. Моск. Ун-та, сер. 5, География № 1, сс. 35-40, УДК 551.462.551.461
- Кънчев, И., Я. Герчева. 1992. Геоложка карта на България в мащаб 1:100000, картен лист Долни Чифлик. Геология и Геофизика АД, ВТС Троян.
- Кънчев, И. 1995. Обяснителна записка към геоложка карта на България в мащаб 1:100000, картен лист Долни Чифлик. Геология и Геофизика АД, 113 с. ВТС Троян.
- Лилиенберг Д.А., Мишев К.И., Попов В.И. Новые данные о черноморских террасах Странджинского побережья Болгарии // Докл. АН СССР. 1964. Т. 159. № 3. С. 552-555.
- Петрова, А., Л. Михайлова, В. Василева. 1992. *Геоложка карта на България в мащаб 1:100000, картен лист Поморие*. Геология и Геофизика АД, ВТС Троян.
- Петрова, А., Л. Михайлова, В. Василева. 1994. *Обяснителна записка към геоложка карта на България в мащаб 1:100000, картен лист Поморие*. Геология и Геофизика АД, 37 с., ВТС Троян.
- Попов, Вл., К. Мишев 1974. *Геоморфология* на българското черноморско крайбрежие и шелф, Publ. House of Bulg. Acad. Sci., 267 p.
- Синьовски, Д. Вълчев, Б., Синьовска Д., 2019. Предварителни днни за Нимфейската тераса в местността Герена, западно от гр. Созопол. Спис. На БГД, год. 80, кн. 3, с. 218–220.
- Синьовски, Д. 2021. Холоценските флукуации на черноморското ниво и човешките дейности по Южното Черноморие. Спис. На Бълг. Геол. д-во, год. 82, кн. 3, 2021, с. 259–261
- Федоров, П. В. 1956. *О современной эпохе в геологической истории Черного моря*. - Докл. АН СССР, 110, 5; 839-841.
- Федоров П.В. 1959 *О колебаниях уровня Черного моря в послеледниковое время* // Докл. АН СССР. 1959. Т. 124, № 5.
- Федоров П.В., Лилиенберг Д.А., Попов В.И. 1962. Новые данные о террасах Черноморского побережья Болгарии // Докл. АН СССР. 1962. Т. 144. № 2. С. 431-434.
- Федоров, П. В. 1963. Стратиграфия четвертичных отложений Крымо – Кавказкого побережья Черного моря и некоторые вопросы геологической истории Черного моря. М., Наука. 25–33.
- Chepaluga, A. L. 2007. The late glacial great flood in the Ponto-Caspian basin. In Yanko-Hombach, V., Gilbert, A. S., Panin, N. and Dolukhanov, P. (eds) *The Black Sea Flood Question: Changes in Coastline, Climate and Human Settlement*. Dordrecht, Springer: 119–148
- Fauache, E. et al. 2012. *The Late Holocene evolution of the Black Sea – a critical view on the so-called Phanagorian regression*. Quaternary International, Volume 266, 17 July 2012, Pages 162-174.
- Genov, I. 2016. *The Black Sea level from the Last Glacial Maximum to the present time*. Geologica Balcanica, 45, Sofia, Dec. 2016, pp. 3–19.
- Lericolais G., Guichard F., Morigi C., Minereau A., Popescu I., Radan S. 2010. *A post Younger Dryas Black Sea regression identified from sequence stratigraphy correlated to core analysis and dating*. Quaternary International 225 (2010) 199-209. [www.elsevier.com/locate/quaint](http://www.elsevier.com/locate/quaint)
- Peev, P., Farr, H., Slavchev, V., Grant, M., Adams, J., and Bailey, G., Bulgaria: 2019. *Sea-Level Change and Submerged Settlements on the Black Sea* pp. 393- 412. In: G. Bailey et al. (eds.), *The Archaeology of Europe's Drowned Landscapes*, Coastal Research Library 35, [https://doi.org/10.1007/978-3-030-37367-2\\_20](https://doi.org/10.1007/978-3-030-37367-2_20)
- Ryan, W.B.F., Pitman IIIrd, W.C., Major, C.O., Shimkus, K.M., Moskalenko, V., Jones, G.A., Dimitrov, P.S., Gorür, G., Sakiñ, M., Yüce, H., 1997. An abrupt drowning of the Black Sea shelf at 7.5 kyr BP. In: Special Publication, *FluvialMarine Interactions*. Geo-Eco-Marina, pp. 119-126.
- Ryan, W.B.F., Major, C.O., Lericolais, G., Goldstein, S.L., 2003. Catastrophic flooding of the Black Sea. *Annual Reviews Earth and Planetary Sciences* 31, 525-554.
- Sinnyovsky, D. 2020a. Holocene transgressions in the area of the Burgas Lakes complex – manifestation of global climatic fluctuations. – *J. Mining and Geol. Sci.*, 63, 1, 243–248.
- Sinnyovsky, D. 2020b. Holocene deposits of Varna Lake. – *J. Mining and Geol. Sci.*, 63, 1, 249–254
- Slavova, K. 2009. About the fluctuation of the Black sea basin after the last Glacial Maximum and early Holocene. Institute of Oceanology, BAS, Varna, Bulgary. УДК 551.465



## GEOLOGICAL PHENOMENA IN THE AREA OF THE VILLAGES OF GARA BOV AND BOV (WESTERN BULGARIA)

Yavor Ivanov, Irina Ivanova

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia;  
E-mail: y.ivanov@abv.bg

**ABSTRACT.** The villages of Gara Bov and Bov are located on the border between the Srednogorska and Zapadnobalkanska zones, in the Golema Planina Mountain, part of the Western Stara Planina Mountain. Several geological phenomena were formed in the Triassic rocks (Petrohan Terrigenous Group) and in the Jurassic rocks (the Kostina Fm, the Ozirovo Fm, the Bov Fm, and the Javorets Fm) in the valleys of the Bovska and the Treskavets Rivers. Their description is the main aim of this article. The observed formations are of geomorphological, paleotectonic, paleontological, and stratigraphical character. They include rock cliffs, a rock doll, the Bovska River cascade, a paleolandslide, a non-conformity, and several outcrops of Jurassic fossils. The geomorphological sites are of aesthetic value, and the rest are of scientific value according to the classification of the geological phenomena. All sites are of local significance according to the original Bulgarian methodology for the estimation of geological phenomena.

**Keywords:** Bov, geological phenomena, Western Bulgaria.

### ГЕОЛОЖКИ ФЕНОМЕНИ В РАЙОНА НА СЕЛАТА ГАРА БОВ И БОВ (ЗАПАДНА БЪЛГАРИЯ)

Явор Иванов, Ирина Иванова

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

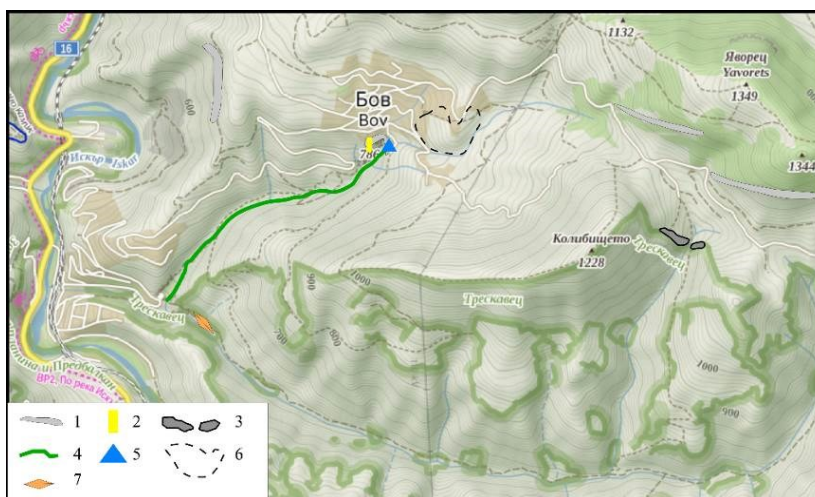
**РЕЗЮМЕ.** Землището, в което попадат селата Гара Бов и Бов се намира на границата между Средногорската и Западнобалканската зона, в масива на Голема планина, част Западна Стара планина. Редица геоложки феномени са оформени в триаските (Петроханската теригенна група) и юрските (Костинска, Озировска, Бовската и Яворецката свита) скали в долините на реките Бовска и Трескавец. Описването им е основна цел на настоящата статия. Наблюдаваните образувания са с геоморфоложки, палеотектонски, палеонтоложки и стратиграфски характер. Включват скални венци, скални кукли, каскадата на Бовска река, палеосвлачище, несъгласие и няколко разкрития на юрски фосили. Геоморфоложките форми са с естетическа стойност, а останалите с научно значение по класификацията на геоложките феномени. Всички обекти са с локално значение по оригиналната българска методика за оценка на геоложките феномени.

**Ключови думи:** Бов, геоложки феномени, Западна България.

### Въведение

Землището на селата Гара Бов и Бов, с течение на годините, се е превърнало в привлекателен за туристите район заради впечатляващия ландшафт, близостта му до София и лесната достъпност на терена. Намира се в северния дял на Голема планина (Западна Стара планина), в долината на Бовска река (фиг. 1). Западната му граница е очертана от р. Искър, а южната от р. Трескавец, която води началото си от изток, и задава и

източните предели на площта. На север за ограничителна линия служи масивът на връх Яворец. Статията има за цел да представи геоложкия строеж на изучавания район и да популяризира най-отличителните геоложки феномени, попадащи в обхвата му – скални венци, скални кукли, ритли, каскадата от водопади на Бовска река, палеосвлачище, несъгласие и находища на юрски фосили. Изброените обекти не присъстват в Регистъра и кадастъра на геоложките феномени.



Фиг. 1. Схематична карта на изследвания район

1 – скални венци, 2 – скална кукла, 3 – Бовски ритли, 4 – каскадата на река Бовска, 5 – водопад „Под Камико“, 6 – палеосвлачище и фосилно находище, 7 – несъгласно покриване

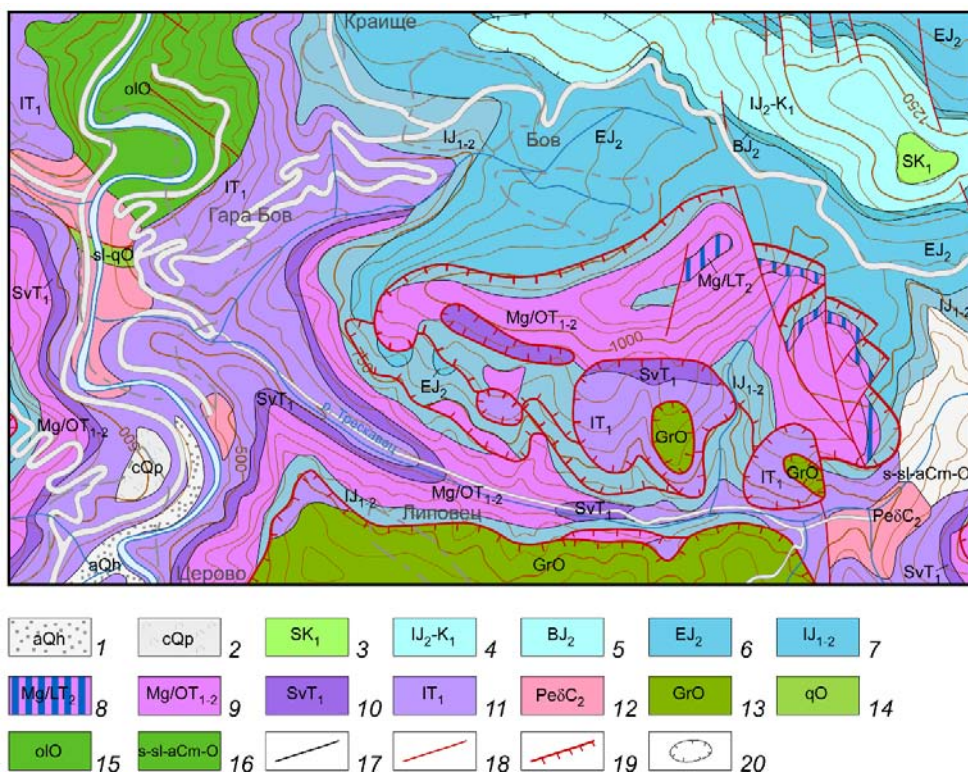
## Данни за геоложкия строеж на района

### Стратиграфия

В изследвания район се разкриват палеозойски интрузивни, метаседиментни и седиментни скали, триаски и юрски теригенни и карбонатни последователности, както и кредни седиментни скали (фиг. 2).

**Палеозойската ератема** включва ордовишки седиментни и метаседиментни последователности, както и карбонски интрузивни скали. Северно от с. Гара Бов река Искър дълбае коритото си в *олистостромната единица*

(Ангелов и др., 2008; Долен Ордовик?), изградена от филитизирани аргилити, алевролити и кварцити. Западно от с. Гара Бов се разкрива пачка кварцити от *алевролитово-аргилитовата метазадруга* (Antonov, 1989; Среден-Горен Ордовик?). Аргилитите, алевролитите и кварцитите на *Грохотенската свита* (Спасов, 1958; Ордовик) се наблюдават в югоизточните части на изследваното землище. На повърхността и във вертикални откоси в югозападния край на района се разкриват диоритите на къснокарбонския *Петрохански плутон*.



Фиг. 2. Геоложка карта на изследвания район

1–2 – Кватернер: 1 – алувий (Холоцен); 2 – колувиални наслаги (Плейстоцен); 3 – Долна Креда (Бериас–Хотрив): Салашка свита; 4 – Средна Юра–Долна Креда: Западнобалканска карбонатна група – Гложенска (Титон–Бериас), Гинска (Кимеридж–Титон) и Яворецка (Калов–Кимеридж) свита; 5–7 – Долна-Средна Юра: 5 – Бовска (Бат) свита, 6 – Етрополска, 7 – Озировска (Синемур–Аален) и Костинска (Хетанж–Синемур) свита; 8–11 – Триас: 8 – Могилска свита, Лакатнишки член (Аниз), 9 – Могилска свита, Оплетненски член (Оленек–Аниз), 10 – Свидолска свита (Оленек); 11 – Петроханска теригенна група (Долен Триас); 12 – Горен Карбон: Петрохански плутон; 13–16 – Ордовик: 13 – Грохотенска свита, 14 – алевролитово-аргилитна метазадруга, 15 – олистостромна единица; 16 – Камбрий–Ордовик: пясъчничково-алевролитово-аргилитна метазадруга; 17 – литостратиграфски граници; 18 – разлом; 19 – разсед; 20 – граница на колувиално-свлачищни блокове

**Триаската система** е представена от континентални теригенни (Петроханска теригенна група) и плитководни карбонатни последователности (Искърска карбонатна група).

**Петроханската теригенна група** (въведена от Тронков, 1981; Долен Триас), която се разкрива на повърхността в западната и южната част на изследвания район, покрива несъгласно скалите на олистостромната единица или апофизите на Петроханския плутон. Характеризира се с присъствието на червени пясъчници с прослойки от алевролити, аргилити и конгломерати. Текстурата на по-груботеригенните слоеве е масивна, плоскопаралелна или косослоеста. Дебелината на единицата варира от 35 m до над 200 m. Горната граница с

Искърската карбонатна група (въведена от Тронков, 1981; Оленек–Карн) е несъгласна.

В рамките на площта *Искърската карбонатна група* е представена от Свидолската и Могилската свита.

**Свидолската свита** (въведена от Чаталов, 1974; Спат), която е с дебелина от 25 до 40 m, представлява теригенно-карбонатна последователност, изградена от червени (в основата) до пъстри пясъчници, алевролити и аргилити с прослойки от мергели и варовици. Скалите на свитата могат да бъдат видени само в единични разкрития, намиращи се в части на долината на Бовска река. Единицата се разполага с постепенен литоложки преход върху Петроханската теригенна група.

Върху Свидолската свита, с бърз литоложки преход, се разполага *Могилската свита* (въведена от Ассерето и

др., 1983; Оленек-Аниз) с два члена: Оплетненски (въведен като Оплетненска свита от Тронков, 1968; Оленек-Аниз) и Лакатнишки (въведен като Лакатнишка свита от Тронков, 1968; Аниз). *Оплетненският член* е изграден от редуването на тънко- до среднопластови микрозърнести и органогенни варовици и доломити, чиято дебелина варира от 80 до 200 m. Разкрива се в източните и югоизточните части на терена в основата на скални венци. *Лакатнишкият член* се наблюдава в ограничени разкрития в най-южните части на изследвания район. Включва дебелопластови до масивни варовици с дебелина, достигаща 40 m.

**Юрската система** се разполага трансгресивно върху триаските седименти, съставена е от теригени, теригенно-карбонатни и карбонатни скали. Представена от следните свити (разположени суперпозиционно) въведени от Сапунов (Сапунов и др., 1967): *Костинска* (Хетанж–Синемур) с дебелина около и под 15 m, изградена от светлосиви до бели кварцови пясъчници, която чрез бърз преход преминава в *Озировска* (Синемур–Аален), включваща теригенно-карбонатни скали – разнообразни варовици, пясъчливи варовици и мергели с дебелина от 2,5 до 35 m.

*Етрополската свита* (Аален–Байос), покриваща с рязък литоложки контакт Озировската, е изградена от тънкослойни аргилити и алевролити с тъмен сиво-кафяв до черен цвят, които съдържат сидеритови конкреции. В скалите на свитата се наблюдават амонити. Дебелината ѝ се мени от 30 до 200 m. Заема централните части на изучавания терен.

Върху нея, с рязка литоложка граница, се разполага *Бовската свита* (Сапунов, 1969; Бат), която се характеризира с редуването на мергели и глинести варовици, а дебелината ѝ достига 9 m.

Следващите три свити в разреза на Юрската система принадлежат на *Западнобалканската карбонатна група* – Яворецка, Гинска и Гложенска свита, въведени от Николов и Сапунов (Николов, Сапунов, 1970). Наблюдават се на север и североизток от с. Бов, изграждайки масива на връх Яворец.

*Яворецката свита* (Калов–Кимеридж) е изградена от дебелопластови до масивни, сиви микритни варовици, чиято дебелина е от порядъка на 30 до 45 m. Покрива с рязка литоложка граница скалите на Бовската свита.

*Гинската свита* (Кимеридж–Титон) се характеризира с присъствието на сиви до розови ядчести варовици, съдържащи амонитни ядки, на места с пластове от плътни варовици. В горните нива на единицата ядчестите интервали постепенно намаляват. Дебелина ѝ варира незначително в рамките на 35–40 m.

*Гложенската свита* (Титон–Бериас) е изградена основно от сиви до тъмносиви среднопластови микритни и интракласични варовици. Дебелината на единицата варира от 20 до 30 m. Покрива съгласно Гинската свита, като границата е бърз литоложки преход.

**Кредната система** е представена от *Салашката свита* (Николов, Цанков, 1971; Бериас–Хотрив), под формата на две пачки от пясъчници със силно редуцирана дебелина по билото на масива на връх Яворец – северно и източно от с. Бов. Разполага се съгласно върху варовиците на Гложенската свита.

## Тектоника

Изследваният район се намира непосредствено на север от границата между Западнобалканската (Берковска единица) и Средногорската зона (Свогенска единица) – Видличката дислокация. В северната част на района се разполага Яворецката синклинала (Ст. Бончев, 1910), която се намира в южните части на Западнобалканската зона и е оформена от скалите на Западнобалканската карбонатна група. Средногорската зона е представена в южната част на разглеждания район от алохтона на Бреженския навлак (Ангелов и др., 2008), и по-точно Яворецката люспа, изградена от скалите на Петроханската теригенна група и Искърската карбонатна група, като по южните склонове се разкриват отделни клипи от Искреция навлак, изградени от Грохотенската свита, Петроханската теригенна група и Свидолската свита.

## Описание на геоложките феномени

### Скални венци

Скалните венци са емблематични за района на Искърското дефиле геоморфоложки образувания. В изследвания район те са оформени в скалите на Костинската, Могилската и Яворецката свита.

Впечатляващи са скалните венци, образувани в скалите на Костинската свита. Първият от тях се намира западно от с. Бов. Той е с височина 15 m, дължина около 600 m и посока север-юг. Вторият е в южната крайнина на селото (Табл. 1, 2, 5) и, гледан в план, е с формата на подкова, отворена на югозапад. С последния са свързани още 2 геотопа – скалната кукла „Камината“ и водопада „Под Камико“.

Втората група скални венци са оформени в скалите на Лакатнишкия член на Могилската свита. Наблюдват се в масива на вр. Колибището югоизточно от с. Бов.

Третата група скални венци са оформени в скалите на Яворецката свита. Наблюдват се в масива на връх Яворец, където се намира и холостратотиповият разрез на свитата, както и в югоизточната крайнина на с. Бов (Табл. 1, 1). Тяхната височина надхвърля 20 m. Скалите са силно напукани и по тях се наблюдават кари по първичната напуканост.

### Скални кукли

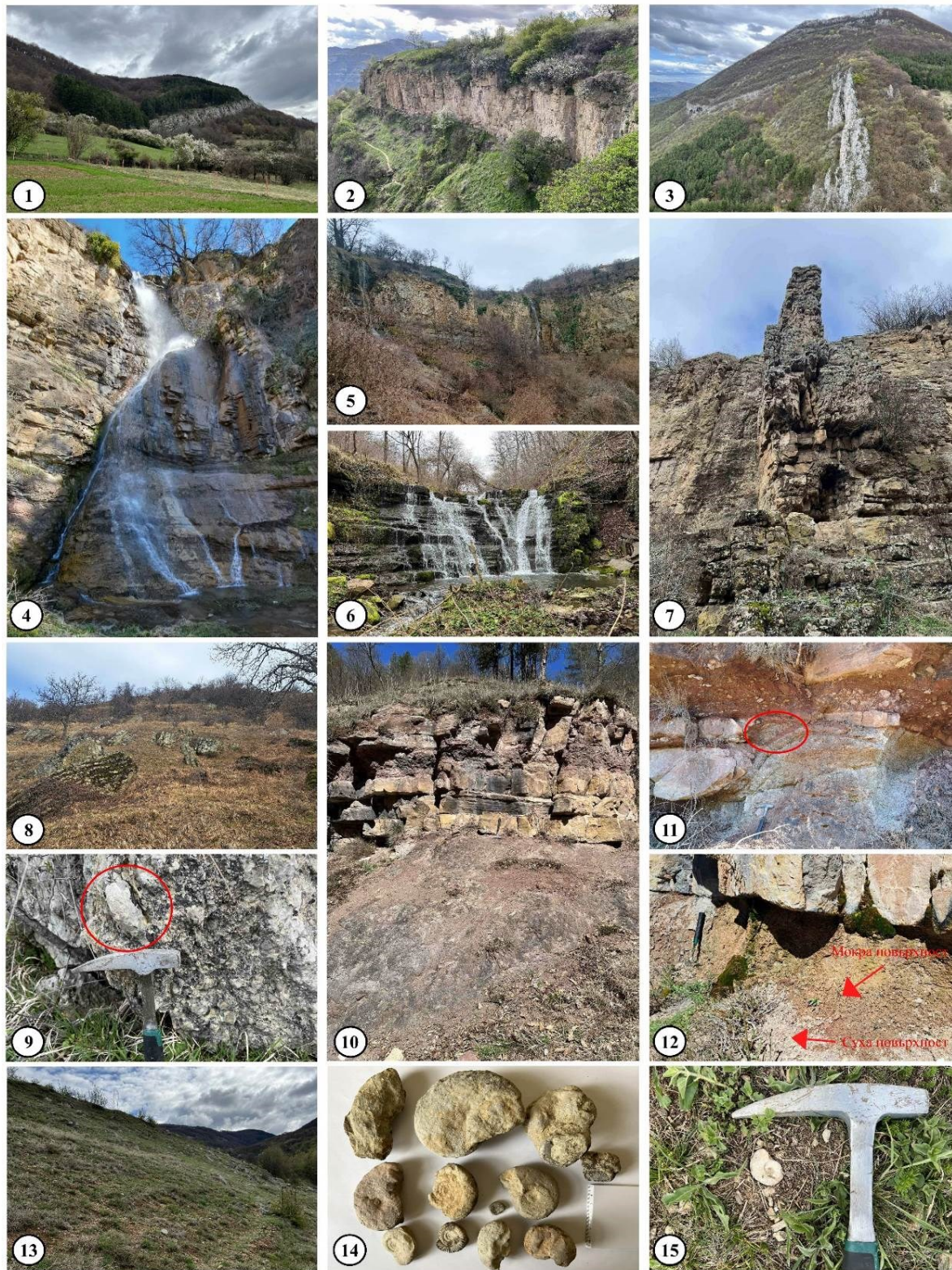
В южната крайнина на с. Бов се намира скалното образувание „Камината“, представляващо скална кукла с височина 12 m, оформена в скалите на Костинската свита (Табл. 1, 7). Структурата получава своето име заради широкия отвор в основата си и издигащата се над нея колона, която се стеснява към върха, напомняща комин. Основни фактори за формирането на куклата са тектонските – блоковата структура, породена от силната напуканост, и изветрителните процеси, които са оформили геотопа в настоящия му вид.

### Скални ритли

Впечатляващ представител на тази група геоложки феномени е наричаният от местното население обект „Бовски ритли“. Образован е в изправените пластове на Лакатнишкия член на Могилската свита. Той е сравняван с известния край с. Лютиброд геоложки феномен „Ритлите“ (Табл. 1, 3).



ТАБЛИЦА I



1 – Скален венец в Яворецката свита по пътя за хижа „Тръстена“; 2, 5 – Скалният венец в Костинската свита южно от с. Бов, по който се образуват водопадът „Под Камико“ и скалната кукла „Камината“; 3 – Бовските ритли, погледнати от срещулежащия им хълм; 4 – Водопадът „Под Камико“; 6 – първият голям водопад от екопътека „Под Камико“, част от каскадата на Бовска река (към посока изток); 7 – скалната кукла „Камината“; 8 – Изглед към палеосвлачището в югоизточния край на с. Бов; 9 – амонит в интракласичен варовик от гинската свита в блок от палеосвлачището; 10, 11, 12 – Различни разкрития на несъгласието между Петроханския плутон и Петроханската теригенна група (несъгласното покриване), ограден е къс от магменото тяло в базалния конгломерат; 13 – Фосилното находище в южния склон на палеосвлачището; 14, 15 – амонитни ядки от основата на Гинската свита (фациес ammonitico rosso)



### Каскадата от водопади на Бовска река

Води своето начало от южния край на с. Бов и приключва в източния край на с. Гара Бов. Дължината на участъка от речната долина, в който се наблюдава каскадата от водопади, достига 2 km (Табл. I, 4–6). Най-високо разположеният водопад е оформен в скалите на Костинската свита, но почти цялото ждрело е образувано в скалите Петроханската теригенна група. Най-големият водопад за образуването е и първи – „Под Камико“. Височината му достига 40 m, а водата се спуска от скалния венец под с. Бов. Дебитът му е силно променлив, като през периодите на снеготопене и засилени валежи се появяват 2 допълнителни пада вдясно от него. Останалите водопади от каскадата са с по-малки размери (1–2 до 5 m), но надвишават 20 на брой. Те са образувани от терасирането на долината, когато реката достигне поздрави пластове от Петроханската теригенна група. Могат да бъдат забелязани и тераси с антропогенен произход.

### Палеосвлачище

Морфологията, генезисът и наличието на този и подобни геоложки обекти в района са описани от работата на Московски и Мандов (1983). Самото палеосвлачище се намира върху източния склон на село Бов (Табл. I, 8, 13). Представлява разпръснати скални блокове с разнообразни размери от Гинската свита, плуващи в кватернерен глинесто-песъчлив матрикс. Имат заоблена форма и липсва единна ориентация на слоестостта им.

### Несъгласие

При разклонението за екопътека „Под Камико“, в посока югоизток (на около 500 m от центъра на с. Гара Бов), по поречието на р. Трескавец, се разкрива несъгласие от типа несъгласно покриване между апофиза от Петроханския плутон и долнотриаските седименти на Петроханската теригенна група. В разкритието, дълго почти 100 m, границата е рязка и изключително добре запазена (Табл. I, 10–12). В основата на покриващите седиментни скали се наблюдава базален конгломерат, изграден от късове от плутона. Последният е силно грусиран. Пукнатините, пресичащи и двете скални разновидности, при водонасищане на масива играят ролята на малки дренажи (Табл. I, 12).

### Фосилни разкрития

Привързани са към скалите на Озировската, Етрополската и Гинската свита. В най-ниските нива на Озировската свита, непосредствено над контакта и с Костинската, се наблюдава фосилоносно ниво с белемнити, бивалвии, брахиоподи и гастроподи. То се разкрива непосредствено над водопад „Под Камико“, както по някои пътеки в с. Бов.

В източната крайнина на с. Бов, сред мергелите на Етрополската свита, се наблюдават сидеритови конкреции. В някои от тях бяха намерени амонити.

Третото фосилно находище се намира в южната крайнина на с. Бов в блоковете от Гинската свита, формиращи разгледаното по-горе палеосвлачище. В някои от тях се наблюдават типичните за Гинската свита фосилоносни пластове с амонитни ядки от световно известния пелагичен фациес „ammonitico rosso“ (Табл. I, 13–15).

Екземпляри от находището, събрани по време на проучвания през 2010 г., са изложени в Националния природонаучен музей при БАН.

### Геоконсервационно значение на геотопите

Съгласно класификацията на геоложките феномени, скалните венци, скалните кукли и каскадата попадат в групата на обектите с естетическа стойност, а палеосвлачището, несъгласието и фосилните разкрития се отнасят към обектите с научна стойност. Според оригиналната българска методика за оценяване на геоложки феномени (Синьовски и др, 2002), те попадат в групата на феномените с локално значение.

Като цяло, геотопите от изследвания район имат висока научна и образователна стойност. Тук се провеждат учебни практики по палеонтология и стратиграфия, седиментология, структурна геология на студентите от Минно-геоложкия университет „Св. Иван Рилски“.

### Заклучение

Геоложките феномени в района на селата Гара Бов и Бов са добре запазени и лесно достъпни поради наличието на добра пътна инфраструктура (шосето София – Мездра по Искърския пролом и железопътната линия западно от него). Феномените също така са в близост един до друг и почти всички са част от екопътека „Под Камико“, което улеснява посещаването им. Екопътеката е лесна за изминаване, но въпреки това не е особено популярна. Липсата на информационни табели, добра маркировка до началото на прехода и интерпретативни геоложки маршрути са основната причина към района да не се проявява голям туристически интерес. Популяризирането на феномените ще има и положителен ефект към икономическото развитие на селата в района. Благодарение на близостта му до други райони с геоложки феномени, землището между с. Гара Бов и Бов може да бъде част и от бъдещия геопарк „Искърско дефиле“.

**Благодарности.** Изказваме благодарност на рецензента доц. д-р Борис Вълчев за направените препоръки към ръкописа на статията.

### Литература

- Ангелов, В., М. Антонов, С. Герджиков, П. Петров, Х. Киселинов, Г. Айданлийски, В. Вълев. (2008). *Обяснителна записка към геоложката карта на Република България в М 1:50 000, картен лист К-34-35-Г (Лакатник)*. МОСВ, Българска национална геоложка служба, С., Унискорп ООД, 92 с.
- Ангелов, В., М. Антонов, С. Герджиков, П. Петров, Х. Киселинов, Г. Айданлийски, В. Вълев. (2009). *Геоложка карта на Република България в М 1:50 000, картен лист К-34-35-Г (Лакатник)*. МОСВ, Българска национална геоложка служба, С., Апис 50 ООД.
- Ассерето, Р., Г. Чаталов, Д. Тронков. (1983). Могилска свита (нижний-средний триас) в Западной Болгарии. – *Geol. Balc.*, 13, 6, 25–27.



- Бончев, Ст. (1910). II. Главни линии в геологичния строеж (направа) на Западна Стара планина. – *Тр. Бълг. природоизп. д-во*, 4, 1–59.
- Московски, С., Г. Мандов. (1983). Геоложки аспекти на палеосвлачищата в района на Зимевиското плоскогорие (Западна Стара планина). – *Год. Соф. унив.*, 77, кн. 1 – Геология, 217–235.
- Николов, Т., И. Сапунов. (1970). О региональной стратиграфии верхней юры и части нижнего мела в Балканах. – *Докл. БАН*, 23, 11, 1397–1400.
- Николов, Т., Ц. Цанков. (1971). Бележки за литостратиграфията на част от долнокредните седименти в Западните Балканиди. – *Изв. геол. инст., Сер. стратигр. и литол.*, 20, 63–70.
- Сапунов, И., П. Чумаченко, В. Шопов. (1967). Биостратиграфия на долноюрските скали при с. Комщица, Софийско (Западни Балканиди). – *Изв. геол. инст., Сер. стратигр. и литол.*, 16, 125–143.
- Сапунов, И. (1969). Относно някои съвременни стратиграфски проблеми на юрската система в България. – *Изв. геол. инст., Сер. стратигр. и литол.*, 18, 5–20.
- Спасов, Х. (1958). *Фосилите на България. Т. 1. Палеозой.* С., БАН, 91 с.
- Тронков, Д. (1968). Границата долен триас–среден триас в България. – *Изв. геол. инст., Сер. палеонт.*, 17; 113–131.
- Тронков, Д. (1981). Стратиграфия триасовой системы в части Западного Средногорья (Западная Болгария). – *Geol. Balc.*, 11, 1, 3–20.
- Чаталов, Г. (1974). Фации в Свидольской свите (нижний триас) Тетевенского антиклинория. – *Докл. БАН*, 27, 2, 239–242.
- Antonov, M. (1989). Morphology and development of axial-plane cleavage in low grade metamorphic rocks from the Rzhana mountain, NW Bulgaria. – *In: XIV Congr. CBGA*, 2, 478–481.

## HYDROGEOLOGICAL CONDITIONS IN THE ZHELEZNITSA MINERAL WATER DEPOSIT, PROSPECTS FOR DEVELOPMENT

Ivaylo Petkov

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: [i.petkov@mgu.bg](mailto:i.petkov@mgu.bg)

**ABSTRACT.** The Zheleznitsa mineral water deposit is located in the fence massifs of the Sofia Graben, on the northern side of the Plana pluton, and around 2 km to the east of the village of Zheleznitsa. It is manifested by two groups of natural springs: the group in the valley of the Selska River and a group in the valley of the Vedena River. A total of 13 springs comes out through fissures in the diorites of the Plana pluton, the largest two being captured by concrete shafts. To uncover additional quantities, two design and exploitation boreholes were subsequently drilled, which were left to self-fill, and as a result, the flow rate of the high-lying springs dried up. The chaotic use of this water over the past 30 years, mainly associated with a collapsing mineral bath, carpet washing, and water logging of part of the outflows into the river in the form of small stone pools, necessitates a comprehensive assessment of the available archive data, analysis and summarising of the existing hydrogeological and hydrochemical information. Guidelines are offered for disclosing the full potential of the deposit and achieving a sustainable and manageable yield of good quality and higher temperature, with a view to the potential for utilisation.

**Key words:** ground water, mineral water, geothermal resources, geothermy.

### ХИДРОГЕОЛОЖКИ УСЛОВИЯ В НАХОДИЩЕ НА МИНЕРАЛНИ ВОДИ „ЖЕЛЕЗНИЦА“, ПЕРСПЕКТИВИ ЗА РАЗВИТИЕ Ивайло Петков

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

**РЕЗЮМЕ.** Находище на минерални води „Железница“ е разположено в оградните масиви на Софийския грабен, от северната страна на Планския плутон и на около 2 км източно от с. Железница. Проявено е чрез две групи естествени извори – групата в долината на р. Селска и група в долината на р. Ведена. Общо по пукнатини в диоритите на Планския плутон излизат 13 извора, като най-големите два са каптирани с плитни бетонни шахти. За разкриването на допълнителни количества впоследствие са прокарани два проектно-експлоатационни сондажа, оставени на самоизлив, и в резултат на което дебитът на високо разположените извори пресъхва. Хаотичното използване на тези води през последните 30 години, свързано главно с разрушаваща се баня, пране на килими и водохващане на част от изливащите се в реката под формата на малки каменни басейни, налага да се направи цялостна оценка на наличната архивна информация, анализ и обобщаване на съществуващата хидрогеоложка и хидрохимична информация. Предлагат се насоки за разкриване на цялостния потенциал на находището и постигането на устойчив и управляем добив с добро качество и по-висока температура с оглед потенциала за утилизирани.

**Ключови думи:** подземни води, минерални води, геотермални ресурси, геотермия.

### Въведение

Софийската котловина е една от най-богатите области в световен мащаб на минерални води. Към момента в Софийската котловина и оградните планини има разкрити и обособени 31 находища с 71 водоизточника (експлоатационни сондажи и каптирани извори). Проведените мащабни геоложки, геофизични и хидрогеоложки проучвания в Софийското поле през 60-70-те години на миналия век, както и тези, свързани с проучванията на въгленосни и рудоносни зони, дадоха информация за хидротермалния потенциал в Софийската котловина.

В резултат на всички тези проучвания са построени множество къпални, балнеологични центрове, бутилиращи предприятия, басейни и други съоръжения за рекреативен туризъм. За съжаление последвалата икономическа криза и липса на план за управление до преди няколко години на тези находища, водят до влошаване на тяхното състояние. Множество от водоизточниците са оставени без регулярна поддръжка, а други, поради липса на интерес, административни неруредици, неправилно управление или липса на инвестиции, даже не достигат до рационалното използване на техния потенциал и остават да съществуват в условията на разруха.

Едно такова находище на минерални води се намира в непосредствена близост до с. Железница. Известно от далечното минало, изключително привлекателно като локалация, но след неговото дейтално проучване през 70-

те години, остава неразработено и се ползва като примитивна къпалня и пране на килими, без да се инвестира към момента в развитието му като атрактивно място за балнеологичен или рекреативен туризъм (фиг.1).



Фиг. 1. Сондажи с минерална вода и банята в с.Железница

Поради гореизложеното, настоящата разработка има за цел да анализира актуалното състояние на съществуващите съоръжения и въз основа на събраната информация да даде насоки за оптимизиране и регулиране на водовземането. Дават се насоки и конкретни предложения за развитие на потенциала му изхождайки от химическия състав на минералните води и балнеологичната му оценка.

## Геоложка и хидрогеоложка изученост

Районът обособен между планините Витоша и Плана, през годините е представлявал интерес като геоложка забележителност и поради тази причина е бил обект на множество проучвания. По-забележителните от тях са картите: М.Йорданов – М1:5000 (1960), Д. Кожухаров и др. М 1:200000, П.Ст.Петров. Съществуващата геоложка информация от многобройните изследователи е обобщена на новите геоложки карти в М 1:1000 000, картени лист Перник (Ив. Загорчев и др., 1991,1994). Детайлни геоложки проучвания с множество сондажи са извършени в Чукуровския и Палкалийски въгленосни басейни. Проучвани са и рудните проявления в Планския плутон и неговата околност, както и минерализациите около Витошката интрузия.

Първите официални данни за топлите минерални извори на Железница са описани от: Добрев, 1903, Г. Бончев, 1939, Ас. Азманов, 1930, 1940 и др. През годините находището е описвано в различни обобщителни публикации, курортни справочници, атласи и др. Детайлно, хидрогеоложките условия в района на находище на минерални води (НМВ) „Железница“ са почти изцяло изяснени при прокарването на двата сондажа – С-1хг и С 2 хг, в периода 1973-75 г. , а резултатите от проведените изпитвания са обобщени в доклада на Зл. Кръстев, 1975. Данни за периодичните измервания на дебитите и температурите на водоизточниците в Железница са публикувани и в хидрогеоложките годишници (до 1989 г.), издавани от Главно управление „Хидрология и метеорология“ при БАН. Информацията за находището е актуализирана през 1996 г., когато е направена преоценка на геотермалните ресурси на Софийския басейн (Петров, П. Ст. и кол., 1996 г.) по задача на Министерството на околната среда и водите (МОСВ). Последните официални данни за находището са от преди десетина години, когато е изготвен доклад, въз основа на който са определени и ресурсите на находището.

Физико-химичните анализи на водите през годините са извършвани от редица автори: В. Куситаева, Е. Пенчева, М. Дамянова Л. Владева и др.

## Хидрогеоложки условия

Подземните води в района на Железница и оградните планини Витоша, Плана, Лозенска са порови, пукнатинно – карстови и пукнатинни от съседните склонове на Рила и Верила. Широко разпространените в областта докамбрийски и палеозойски формации, от практическа гледна точка, не се явяват колектори на подземни води. Неводоносни в района са и неогенски глинесто-песъчливи отложения, запълващи грабеновата структура.

**Поровите води** са със спорадично разпространение, като единствено техен колектор се явяват песъчливите прослойки в кватернерните отложения.

**Пукнатинните води** са с най-широко разпространение в изследвания район. Формирани са в силно напуканите диорити и гранитоиди на Планския плутон, които в горната си част са студени и безнапорни, а в дълбочина напорни термоминерални води, дрениращи се по периферията от множество извори.

**Студените пукнатинни води** са с локално разпространение под формата на малки извори и дебит

под 1 l/s, обикновено привързани към пукнатини и разломите в приповърхностната зона на интрузията. От тях водят началото си множество ручей и потоци.

**Карстово-пукнатинни води**, които са се формирали във варовиците и доломитите на Лозенецката планина се характеризират с относително по-голям дебит. Пресни и студени пукнатинни води извират и от вулканите по източните склонове на Витоша.

## Хидротермално находище Железница

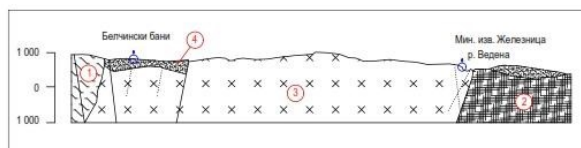
На около 2 km източно от центъра на село Железница, между склоновете на Плана планина и Витоша, се разкриват значителен брой топли извори, обособени в естествени групи – група в долината на р. Селска и група в долината на р. Ведена (фиг.2).



Фиг.2. Местоположение на Находище на минерални води „Железница“

Групата в долината на р. Селска (Железничка река) е разположена по десния бряг на реката (Петров и кол., 1996 г.), на надморска височина около 890 m.

В участък от стръмния склон с дължина около 80 m, от пукнатини в диоритите на Планския плутон, излизат 13 извора. Два от изворите с най-голям дебит са каптирани с плитки бетонни шахти. В целия участък скалите са силно напукани и разломени. Преобладава СИ-ЮЗ ориентирана пукнатинна система, най-често с променлив наклон на ЮИ, по-която са наредени отделните извори. Находището на изток се ограничава от диабазо-филитоидната формация и гнайсовата докамбрийска задруга, които представляват естествена хидравлична бариера за пукнатинните терми, южно от извора(фиг.3 ).



Условни означения:

- 1 - Метаморфен комплекс; 2 - Диабазфилитоидна формация;
- 3 Диорити; 4 – Терциер и Кватернер.

Фиг. 3. Геоложки профил през Планския плутон.

Областта на подхранване на НМВ „Железница“ е разположена в издигнатите части на Планския плутон около връх Манастирище на надморска височина около 1200 m. Дренирането на водите се осъществява

посредством множество извори и изградени водоземни съоръжения.

Важно е да се отбележи, че НМВ „Железница“ включва само изградените водоземни съоръжения С-1хг и С-2хг, към които са добавени и измерените количества от каптираните извори КЕИ № 1 „Горен“ и КЕИ №2 „Баня“, за които респективно са определени експлоатационните ресурси. Групата извори в р. Ведена „Баницето“, които представляват естествени изходища на минерална води (извори), по същество не са водоземни съоръжения и съответно не са част от това проучване.

С оглед дълбочинното проучване на находището и разкриването на допълнителни количества минерална вода, през 1972 -1973 г. в границите на изворната група (до най-западните извори), са прокарани два проучвателно-експлоатационни сондажа (Кръстев, 1975): С-1хг (с дълбочина 236.1 m) и дублиращият го С-2хг (с дълбочина 600.2 m), разположен на 8 m западно от С-1хг. На последния сондажният ствол е изкривен и забоя е отклонен на 80 m източно от устието. И за двата сондажа е характерно преминаването през амфиболити в интервала от 75 до 134 m, което намалява общата дебелина и обема на водоносните диорити. Сондажите са оставени да текат свободно на самоизлив в резултат на което дебитът на естествените извори намалява съществено, като най-високо разположените извори пресъхват.

### Събиране, анализ и актуална интерпретация на наличната хидрогеоложка информация за находището

За анализиране на актуалното качествено и количествено състояние са обобщени всички данни (публикувани и непубликувани) за измерените дебита на групата извори в Селската река и тези от сондажите до тях. Въпреки достатъчно представителна редица от измервания, за сезонните колебания в температурите и дебитите на водоизточниците, липсват системни и точни измервания.

Първите данни за изворите от групата на Селската река, датират от 1930 г., от проведените изследвания на И. Спиридонов и Ас. Азманов, които измерват общия дебит на 13-те извора на около 8 l/s. През 60-те и 70-те години други автори измерват за същите извори дебит от 5,4 l/s при температура на водата от 23 - 31,7°C. До изграждането на двата проучвателни сондажа в началото на 70-те години може да обобщим, че сумарният дебит на изворите варира от 3-9 l/s. Последните измервания, преди началото на сондажните проучвания на 6 от изворите (фиг.3) сумарен дебит на изворната група Q=8.2 l/s при температура 24.5 – 31.5°C.

При прокарането на сондаж С-1хг през 1972 г. се установява, че в интервала от 176 – 234 m се преминават силно напукани диорити, разкриващи вода на самоизлив с първоначален дебит Q=20 l/s и температура 28°C. Първоначалното статично водно ниво е на 9.05 m над терена. Почти една година след прокарането на сондажа дебитът му е намалял до Q=12.1 l/s при температура на водата 30°C.

Последвалото прокаране на сондаж С-2хг, аналогично на С-1 хг, пресича водоносната пукнатинна зона на приблизително същата дълбочина - 247 m и разкрива вода

на самоизлив с първоначален дебит Q=2.15 l/s и температура 30°C. Статичното водно ниво е на 9.15 m над терена. На дълбочина 547 m са достигнати неводосните архаички гнайси. Следва да се отбележи, че по-ниските количества добивани от С-2хг се дължат на едновременната му работа със С-1хг, който силно влияе върху дебита му.

При последвалите многостъпални хидравлични тестове, след изграждането на двата сондажа посредством краново регулиране на дебитите и манометрично отчитане на нивото, са определени експлоатационните запаси на находището възлизащи на Q=16,3 l/s. От данните за 50 годишен период на експлоатация, отнесена към последните измервания, извършени от нас през 2023 г., показват, че ресурсите на находището се доближават до първоначалния измерен сумарен дебит на изворите, преди изграждането на водоземните съоръжения (фиг.4.).



Фиг. 4. Изменение на дебита на водоизточниците от находище на минерална вода „Железница“

През 2019 г., със заповед на Министерството на околната среда и водите вече има и утвърдени експлоатационни ресурси на находището, възлизащи на 5,18 l/s, при температура в границите на 29,8 -31,2°C.

### Физикохимичен състав на минералните води

Минералната вода от находище Железница се характеризира като високо алкална (pH=9,1-9,8), хипотермална, с ниска минерализация от 0,232 до 0,237 g/l, карбонатно-сулфатно-натриева и силициева вода, с повишено съдържание на флуорид (1,94 - 2 mg/l), без санитарно-химични и микробиологични признаци на замърсяване. Водата има стабилен характер и отговаря на изискванията на Наредба №14 за курортните ресурси, курортните местности и курортите.

Газовете, отделящи се от водоземните съоръжения и изворите, са изцяло азотни.

Радиоактивността на водите е 1,2-4,6 емана (А. Азманов, 1940).

Водата не е препоръчителна за всекидневна употреба за питейни цели, но изключително благоприятна за някои заболявания и употреба по схема и лекарско предписание.

Питейното балнеолечение с този тип вода оказва благоприятно въздействие върху стомашно-чревния тракт, жлъчно-чернодробни заболявания, бъбречно-урологични заболявания, като приемът трябва да се осъществява по определена схема и след лекарско предписание.

Благоприятно антисептично въздействие при кожни заболявания оказва наличието на силиций в състава на водата.



При използване на водата за външно балнеолечение оказва благоприятно въздействие върху заболявания на периферната нервна система, след оперативни интервенции на опорно-двигателния апарат, гинекологични заболявания.

## Резултати и дискусия

Хидрогеоложките условия в района на находището може да се считат за изяснени до голяма степен. От анализа на режимните наблюдения на дебитите и тяхното намаляване във времето, спрямо първоначалните измервания, можем да направим изводите, че очакваният съществен прираст на водните количества и температура на водата не се потвърждава. Основните причини затова са значителното изтощаване на сондажите спрямо първоначалният самоизлив, дължащ се най-вероятно на малката мощност от около 170 m на водоносните диорити.

Друг фактор, повлиял върху режима на сондажите е бързото сработване на дебити и нива, което не оправдава предпологаемите значителни еластични запаси. Създадените понижения от сондажите в съседните извори, без да водят до тяхното пресъхване, означава че очакваният по-значителен водоприток към тях не се оправдава. Трябва да се вземе под внимание и сравнително близко разположената граница с непроницаемите скали от диабазофилитоизната формация.

## Заклучение

Находище на минерални води „Железница“ е добре проучено. Изяснени са зони на подхранване и дрениране. Определени са експлоатационните му ресурси. Поради половинвековната експлоатация на сондажите без никаква поддръжка, най-вероятно имаме склерозирали стволоче, което също влияе върху дебитите им. В тази връзка е необходимо да се направи обследване с камера и да се набележат мерки (ако е възможно) за възбуждане на сондажите. При невъзможност за предприемане на оздравителни мерки, да се търсят възможности за реализиране на проект, свързан с прокриване на проучвателно-експлоатационен сондаж (Зл. Кръстев, 1975) на около 100-ина m в източна посока от съществуващите съоръжения и дълбочина 200-300 m.

Според всички химични анализи и балнеоложки оценки, приложението на минералната вода с профилактична и лечебна цел е безспорно.

Лошото състояние на каптажите на повърхността налага тяхното отремонтиране. За рационалното и контролирано ползване на минералната вода е необходимо да се монтират водомери и да се премине на кранов режим на ползване.

Остава да бъдат преодолен и чисто административните пречки, които установихме че съществуват и са свързани главно с отчуждаването на земи, които към момента са частна собственост, за да може да бъде проектирана и изпълнена санитарно-охранителна зона (СОЗ) около водоизточниците.

Трябва да се обърне внимание на факта, че находището и прилежащата група извори ще попаднат в общ пояс I на санитарно-охранителната зона около водовземните съоръжения и каптажи. Това автоматично ще доведе до забрана за ползването на прилежащите терени за къпалня и достъпа до банята, която също ще попадне в гриниците на пояс I на СОЗ.

С оглед на гореизложеното, прекрасното и комуникативно местоположение, логично би следвало да се инвестира в изграждането на рекреационен или балнеологичен комплекс, който да функционира целогодишно. В правомощията на кмета е да рекламира и търси евентуален инвеститор на такъв проект или самият той да изготви такъв по текуща програма, като изрично отстоява интересите на жителите на населеното място за достъп до този природен ресурс.

При обхождането на района, подходящи места за реализиране на инвестиционно намерение има в източна посока от сегашната баня, където равнинният и слабо залесения терен позволява осъществяването на такъв проект.

## Литература

- Азманов, Ас. (1940). *Българските минерални извори*. С. Държ. Печатница, 260 с.
- Кръстев, Зл. (1975). *Доклад за резултатите от проведените през периода 1972-1973 г. хидрогеоложки проучвания на находището на субтермална минерална вода при с. Железница, Софийско с оценка на експлоатационните запаси на водите към 1.8.1975 г.* София. (Геофонд V-233).
- Пенчев, П., В.Величков, *Находища на минералните води в района на София*. БАПВ, 46 с.  
<https://bgapv.com/publications.php?item=17>
- Петров, П. Ст., и кол., (1996). *Хидротермална система Плана*. ГИ на БАН, Геофонд МОСВ - № V-522 – 3.
- Петров, П. Ст., и кол., (1996). *Хидрогеотермия на Софийския басейн*. ГИ на БАН, Геофонд МОСВ - № V-522 – 2.
- Щерев, К. 1964. *Минералните води в България*. С. Наука и изкуство, 172 с.
- Щерев, К., (2003). *Стратегия с пространствен модел за използване на потенциала от минералните води и земна топлина (геотермална енергия) на територията на Столична община*.  
[https://sofiaplan.bg/Images/webmaps19112009/\\_8.pdf](https://sofiaplan.bg/Images/webmaps19112009/_8.pdf)



## THE ANCIENT COPPER MINES NEAR AYBUNAR, THE STARA ZAGORA AREA

Ivan Popov

Military Formation (MF) 54830 – Varna, Bulgaria; e-mail: [popovii@abv.bg](mailto:popovii@abv.bg)

**Abstract:** The Balkan Peninsula was home to the first settlers of the European continent. That is why many ancient artefacts and findings exist, such as the Varna Necropolis, the Gradeshnitsa Plate, the Karanova burial mound, the Durankulak Necropolis, and others. The oldest copper mines were discovered in an area near Stara Zagora - Aybunar (Mечи кладенец - The Bear's Well). These mines were the largest of their time. The people who inhabited the territory of Bulgaria were skilled in extracting metals from metal ores and creating various objects from them. Therefore, Bulgarian museums showcase a variety of gold, silver, copper, and other metal items. The antique copper mines in Aybunar are in area of the Starozagorski Mineralni Bani spa complex (the Mineral Spas of the town of Stara Zagora). The oldest evidence of their use dates back to the 5th millennium B.C. According to research and subsequent computations, around 200 people lived in Aybunar, and more than 2500 worked in the copper mines. The mines could yield up to 1000 tonnes of copper which was supplied to the Balkan Peninsula and many other distant locations, as copper was widely used in the antiquity.

**Key words:** Copper mines, antiquity, copper, the area of Stara Zagora, yield

### АНТИЧНИТЕ МЕДНИ РУДНИЦИ В АЙБУНАР, СТАРОЗАГОРСКО

Ivan Popov

Военно формирование (в. ф.) 54830 - Варна

**Резюме:** Континентът Европа е започнал да се населява от Балканския полуостров. Затова са налични множество артефакти и находки от дълбока древност, като Варненски халколитен некропол, плоча от Градешница, Карановска могила, Дуранкулашки некропол и други. Край Стара Загора има една местност Айбунар (Мечи кладенец), където са открити най-старите медни рудници. Те са били най-големите за времето си. Хората, населявали територията на България са умеели да извличат металите от рудите и да ги обработват. Затова в нашите музеи могат да се видят изящни изработки от злато, сребро, мед и други метали. Античните медни рудници в Айбунар се намират в санаториалния курортен комплекс Старозагорски минерални бани. Най-старите сведения за използване им са от V хилядолетие пр. Хр. Според проучванията и изчисленията в селището край Айбунар за живяли около 200 души, а в рудниците са работили повече от 2500, а от изкопаната руда е можело да се добият 1000 т. мед. Рудниците са снабдявали не само Балканския полуостров, но и много отдалечени градове с медна руда. Медта е бил широко разпространен метал в античността.

**Ключови думи:** Медни рудници, античност, мед, старозагорско, добив.

**Въведение:** Земята на България е населена от много отдавна, като различните източници дават различна информация за давността на автохтонното население. На територията на България са възникнали селища много преди други места. Едни от най-старите са край Варна (халколитния некропол), Дуранкулак (най-големия некропол), Провадия, с. Караново, Стара Загора, Пловдив, Плиска и др. Населението по нашите земи е познавало рудодобива, изработвало е предмети от добитите метали.

Намерените златни съкровища край Варна са от ранния палеолит. Те не само доказват че сме били на изключително високо равнище по отношение на златарския занаят, но говорят и за напреднал процес на обществено разслоение, който съществено изменя представите на историческата наука за раннокласовите общества. От същото време са глинените плочки и печати с пиктограми (древни писмени знаци) от с. Градешница, Врачанско, с. Караново, Старозагорско и други селищни могили, които възбудиха изключителен интерес сред специалистите от цял свят. Откритата при разкопки в с. Дуранкулак, Добричко, каменна архитектура е най-ранната за Европа. През октомври 2022 г. се честваше 50-години от откриването на Варненски Халколитен некропол, според много историци най-старото обработено злато в света (Барин, 2017).

**Основно изложение:** Тази изключително древна протоцивилизация се основава както на благоприятните за ранната поява на земеделие и скотовъдство климатични и почвени условия, така и на богатите повърхностни находища на мед – първия метал, който замества камъка при изработването на оръдия на труда и прави истинска

революция в развитието на производителните сили на човешкото общество. На Балканите житната култура е известна още от края на седмото хилядолетие преди новата ера, откъдето се разпространява в останалата част на Европа, а в местността Айбунар (Мечи кладенец), недалеч от Стара Загора, са открити най-старите и най-големи медни рудници в света, експлоатирани още в края на петото хилядолетие преди новата ера (Барин, 2017). Добиваните огромни за онази епоха количества мед не само задоволяват местните нужди, но са и предмет на размяна с близки и далечни земи. Близко до местността „Мечи кладенец“ е с. Караново, където са открити следи от древна цивилизация и много предмети. Не е голямо разстоянието и до „Гробницата на тракийските царе“, която е от по-късен период и показва, че земите на България са били трайно населявани от цивилизации, които са били на висока степен на развитие. Първото известно на науката население на днешните български земи са траките. Преди траките е имало население, което историята нарича "прототраки", а според автохтонната теория може да са били българи (Николов, 1999). Те са били изкусни майстори златари, добивали са руди, имали са големи познания по астрономията и архитектура.

Медта е малко разпространен метал в земните недра. Рудните разработки в местността Айбунар са свидетелство за добив на голямо количество мед, разпространявано на обширната Балкано-Карпатската металургична провинция. Процесът на добиване на руда е започнал още преди халколита (4800-400 г. пр. Хр.). Първите проучвания са направени през 1970-1973 г. Медта и златото са първите метали, употребявани от човека. Това прави рудниците в

Айбунар най-старите медни рудници в света. Според археолози, добиването на мед от тях е започнало около 5000 г. пр. Хр. След изчерпване на рудата, галериите и траншеите на Айбунар са запълвани умишлено с тонове пръст и камъни. Този ритуал е извършен, за да бъдат затворени наранените недра на земята, за да роди отново и да бъде съхранена тайната на земята (Болгурова, 2014). Находища на мед има и сега на територията на Република България.

В съчиненията на древногръцките автори българите са описани като многоброен народ, а Тракия като страна на изобилието и веселието. Тракия е родината на митичния музикант Орфей, а също така и на Спартак, водачът на робското въстание, което разтърсва Римската империя в навечерието на нашата ера. През последните десетилетия българските археолози откриха внушителни гробници с великолепни фрески, мощни укрепления, работилници и изцяло изработени златни съдове и украшения. Намерените в България образци на тракийското изкуство бяха показани в най-големите музеи на света, където предизвикаха възхищението и удивлението на милиони посетители. Проучванията на терена около Старозагорските минерални бани започват от Института за археометалургични изследвания към University College London.



Фиг. 1: Рудник Айбунар край Старозагорски минерални бани.

Селищната могила представлява ритуално стълбище, очертано в могилата, изградено от камъни, споени едни в други от варовик и пясък. В праисторическия обект – „стълбището“ са намерени предмети: керамични съдове, фигурки, инструменти и др. В селищната могила е имало храм и това стълбище е водело към него. Идеята е да се запази древната могила, да се възстанови стълбището и да се извърши възстановка на храма. На 3 км от селищната могила се намират праисторическите Медни рудници на Айбунар, м. Богородична стъпка и античната баня. Замислено е всичко това да стане един цял комплекс. Думата Айбунар е турска и означава "Мечи кладенец". Из цялата територия на България има имена на местности, които са взети от турски и гръцки език. Бунар (кладенец) се среща в названията: Башбунар в Ловеч, Ючбунар в София, чешма Гюлбунар край с. Кичево, Варненско и други.

**Разположение:** Античните рудници Айбунар се намират близо до санаториума Старозагорски минерални бани в Средна гора. Една от забележителностите в курорта е местността "Богородична стъпка". Намира се близо до санаториалния курорт. До нея се стига за петнадесет-двадесет минути от хотел "Гроди". В местността "Богородична стъпка" има параклис, който постоянно е отворен. Рудник Айбунар е близо до Богородична стъпка. Над местността има невисок връх Карнак. Името е същото,

както на известно мегалитно съоръжение в провинция Бретан, Франция. Идва от келтски език, но да не се изненадваме – келти е имало на Балканския полуостров, в района на Ямбол и Карнобат в края на III в. пр. Хр. - цар Кавар.

Местността "Богородичната стъпка", която е наблизо до медните антични рудници се счита за свято място и се твърди, че над скалата има силно енергийно поле. В скалата има вдлъбнатина, пълна с вода и през най-горещите дни на лятото, наподобява човешка стъпка.



Фиг. 2: Местност "Богородична стъпка"

Местността Айбунар, разположена на 8 км северозападно от Стара загора, е в горист терен, през който тече р. Сазлийка. Повърхността на рудното тяло е на 330 – 400 м. надморска височина. Рудникът в ориентиран по посока североизток - югозапад и е с дължина 1,5 км като пресича три хълма: Хасанов трап, Малка Тумба и Чаирлишка Усойна. На определени участъци рудата излиза на повърхността във вид на окислени минерали – малахит и по-рядко азурит. Върху хълмовете са установени 11 рудни разработки. Те са тип кариери с ширина от 0,5 до 10 м и дълбочина от 2 до 18-20 м. Около рудниците са открити керамични фрагменти, сечива от кост и камък, останки от погребения на починали или загинали рудари, които се отнасят към халколита. Рудодобивът, металургията и металообработката са първите истински занаяти в историята на човечеството. Рудните разработки в местност Айбунар, Старозагорско, „Рудна глава“ до Ниш и др. свидетелстват за добив на голямо количество мед, разпространявано в обширния ареал на Балкано-Карпатската металургична провинция – първата и най-активна зона в света, възникнала през 5 хил. пр. Хр.

**Периоди в развитието на обработването на медта:** В развитието на най-ранната металургия Хенриета Тодорова обособява три основни етапа, които се разграничават в зависимост от степента на акумулираната от обществото мед:

- I-ви период: медта през този етап е изключителна ценност, поради което са произвеждани само дребни изделия, изискващи минимално количество мед (игли, шила, мъниста, обици, висулки). Периодът обхваща ранния, средния и началото на късния халколит.
- II-ри период: започват да се произвеждат по-масивни оръдия на труда от мед. Условно този период може да се раздели на два подпериода. През първия (началото на късния халколит) свойствата на медта все още не са добре познати и медните оръдия се правят по подобие на каменните. За изработката им се харчи много метал, самите оръдия на труда са тежки и неудобни. Отличителна черта на втория

подпериод (средата на късния халколит) е оформянето на самостоятелна технология за отливане на медни оръдия на труда, отговаряща на характера на суровината. В изработката на оръдията на труда вече се влага минималното необходимо количество метал. Формите са стройни, типологията бележи значително многообразие, а производителността е висока.

- III-ти период: правят се опити да се придаде по-голяма твърдост на меката мед, подбират се полиметални руди, откриват се качествата на арсена, а заедно с тях и най-ранните технологии за легиране на метала. Въпреки това дълго време оръдията на труда са от чиста мед или с примеси от полиметални руди – арсенът се все още среща рядко. През втората половина на халколита мед е била добивана от около 60 рудника на българска територия и от находища, разположени в европейска Турция, Сърбия и Гърция (Николов, 1999).

**Класификация на медните рудници** според разположението:

- открити – в местността Айбунар; с. Тъмнянка, Старозагорско и Върли бряг, Бургаско);
- шахтово-галерийни – при с. Хрищени, Старозагорско;
- гнездови – с. Зидарово, Странджа.

Някои от рудниците поразяват с размерите си. Например в м. Върли бряг, Бургаско са проучени кариери, които се проследяват в продължение на няколко километра, други кариери достигат на дълбочина до 100 м (Кулев, 2011).

Според химичните анализи на повечето медни оръдия от българските земи е имало два енеолитни меднорудни ареала в България – източен и западен. Въпреки това, не повече от 2/3 от находищата на територията на България са били разработени през халколита. По това време вече са обособени два големи медни ареала: западен с център находището при Рудна Глава (Източна Сърбия) и източен с основно находище Айбунар в Тракия. Последното спада към рудниците от старозагорската група ([https://ancientbg.blogspot.com/2009/01/blog-post\\_06.html](https://ancientbg.blogspot.com/2009/01/blog-post_06.html)).

Рудодобивът и металообработката, практикувани сезонно през пролетта и лятото, изискват специална организация на дейностите: откриване и разкриване на рудната жила, нагряване, охлаждане, разпукване на скалата, натрошаване и сепариране на рудата и нейното смилане, промиване и претопяване. Този обект е с неизмеримо световно значение. Друг един обект, който притежава своята историческа ценност, са римските терми, построени върху минералните извори на Старозагорските минерални бани. Улпий Хероним, първожрец на Августа Траяна, построява със собствени средства баните с обща площ 2500 м<sup>2</sup> – като подарък за града. Притегателен за римляните, които били въздигнали личната хигиена в култ, изворът с минерална вода е обграден с 12 помещения, в които са включени 3 басейна, 2 съблекални, вестибюл и други. Находката е особено ценна, предвид на незавършеното проучване. На север от Айбунар се намира седмият параклис от Старозагорската Света Гора.

Южно от града се намира напълно запазената автентична и неразкрита Берекетска могила – обект от национално значение и резултат от най-голямото праисторическо поселение в България. Там е открита най-старата златна гривна в света – датирана е пет хиляди

години преди Христа, което доказва, че тази цивилизация е по-стара от тези на Месопотамия и Египет с хиляда години! Съпътстващи дейности са осигуряването на дървен материал за крепежи в галериите и за производство на дървени въглища за пещите, направата на сечива от камък и кост, осигуряване прехраната и т.н. Рудникът се датира някъде 5000 г. пр. Хр. Излиза, че шумерите не са първите в света, които добиват руда (Барин, 2017).



Фиг. 3: Меден рудник “Елаците” до Етрополе

**Добиване и обработка на медта:** Най-древният метод за обработка на медна руда е топенето в тигел: рудата се смесва с гориво и се поставя в тигли, направени от глина, смесена с костна пепел. Размерите на тигелите са малки, височината им е 12–15 см, а в капака са предвидени отвори за изпускане на газове. В описаните по-горе керамични огнища от неолита е достигната температура (до 1100° С), достатъчна за получаване на мед, съдържаща до 2% тегловни естествени примеси на арсен, никел, антимон. Впоследствие за топенето на мед започнаха да се организират ямкови пещи (публикувано през 2022 г. в *История на металите, russteroidoff.ru*). В този случай глинени тигел с руда и въглища е поставен в плитка яма със слой въглен, излят върху него. От особено значение е изборът на мястото на топене, което трябва да осигури интензивен въздушен поток в устройството, за да раздуха огъня и да постигне необходимата температура (Черных, 1978).

Направените изчисления сочат, че в добива на медна руда в м. Айбунар са били ангажирани над 3000 мъже, дошли тук от различни селища в района. Първите изследвания в Айбунар са направени през 1970-1973 г. Успешната реализация на рудодобива и металургията очевидно е изисквала строга организация и схема на разделение на труда: миньори, металурзи, ковачи и майстори златари и обслужващ контингент – дървари, копачи, каменоделци, както и хора, осъществяващи търговския обмен на металите. Средно статистически броят на жителите на едно селище от халколита не е надхвърлял 200 души. Върху хълмовете са разкрити 11 рудника със средна дължина 10-15 м, средна ширина 3-10 м, на дълбочина от 1-2 до 18-20 м. По изчисление на проучвателите на халколитните медни рудници от изкопаната руда е могло да се получи 1000 т чист метал, което е едно огромно за древността количество. Показател за качеството на метала и неговата чистота е колко се добива от тон. В България рудите са с много примеси и често са купувани за обогатяване. В Старозагорско отдавна са известни и други големи халколитни рудници: Хрищени, Айбунар, Тъмнянка и Ракитница (Черных, 2009). Сходни в значителна степен геохимични особености до тези на малахитовите образци от Сърнево притежават малахитовите руди от Айбунар и Тъмнянка. Данните са



недостатъчни, за да се направят категорични изводи за произхода на образците, но въз основа на получените резултати от изследването на малахит-съдържащите образци от Сърнево, може да се предположи, че те вероятно са събрани (добити) от медните рудопроявления Айбунар и Тъмнянка (Бъчваров и др., 2017).

България не е бедна страна. Халколитният рудник "Айбунар", Старозагорско, е сред малко познатите обекти у нас. Той е почти невидим. В пластовете от V-IV хил. пр. Хр. са открити множество медни предмети и медна руда. Античният рудник Айбунар е най-старият в света. В античния свят са ценели много златото, медта и солта. В България имаме солници – Провадия и Поморие, както и рудници. Златото е било повече и не е било толкова ценно, както сега. Много се е ценяла солта, за която сега казват, че е била "златото на древния свят". Как се е добивала рудата и как древният народ, населявал Балканския полуостров е извличал метала, си остава не напълно изяснено. Всеизвестно е, че древните цивилизации са познавали методи, неизвестни сега и са имали достижения в много области, които смайват хората дори през XXI-ви век. Били сме добри и в строенето на гробници и некрополи, дори се смята, че българите на балканския полуостров са първите в света и в това отношение. Ако са отлети, медните оръдия трябва да се наклепат допълнително, за да се придаде необходимата твърдост на метала. При оръдия на труда наклепването трябва да се прави периодично, защото нелегирият метал има свойството да се окислява и да губи придадената му твърдост. Ето защо е необходимо внедряването на по-твърд и здрав метал от чистата мед. Такъв метал се оказва бронзът. От него много по-лесно се отливат оръдия, защото бронзът се топи при по-ниска температура (700-900° C) в сравнение с медта (1083° C). Освен това, бронзът е по-устойчив на корозия, а твърдостта му зависи от количеството калай в сплавта. Смята се, че най-доброто съотношение е 90% мед и 10% калай. Възможно е потребностите от мед да са намалели и затова рудниците край Айбунар да не са се използвали активно. Твърде вероятно е залежите на мед, които са били големи, да са се изчерпали и използването на рудниците да е било прекратено.



Фиг. 4: Параклисът до Богородична стъпка- местност близо до Айбунар

Интересно е да се отбележи, че Айбунарското рудно находище е снабдявало с мед не само Североизточната част на Балканския полуостров, но и твърде далечни територии. Така например металът от Карбунското съкровище в Украйна произхожда от Тракия, едно важно доказателство за далечните търговски връзки на нашите земи в древността. Металургичен производствен център

може да бъде локализиран в ареала на варненските наколни селища (Черных, 1978). Основание за това се намира в голямата концентрация в района на медни изделия и своеобразната им, отчасти известна само тук типология. Друг производствен център вероятно е съществувал в района на Драгоман, откъдето произхождат оръдия, бракувани поради грешки в технологията на изливането. В с. Ябълково е открита медна шлага, което е доказателство, че там е топена мед (Николов, 1999).

Античният меден рудник в Айбунар е най-старото подобно сложно съоръжение и в него дълго време се е добивала мед. Проучвания на обекта са правени от гл. ас. Петър Калчев от отдел „Праистория“ в РИМ Стара Загора. Мястото на рудниците според професор д.г.н. Петко Попов сега попада в Горнотракийския руден район.

На отчета на теренни археологически проучвания за 2019 г. на Националния археологически институт с музей към БАН на 19.02.2020 г. доц. д-р Христо Попов направи отчет за дейността по проучване на античните медни рудници Айбунар, старозагорска област. Според доц. д-р Попов рудникът е важен обект за европейската праистория.

**Заключение:** Античните медни рудници в Айбунар са били място, където е бил добре организиран добивът на руда. По българските земи народите са добивали и обработвали металите. Познавали са технологиите за процеса на извличане на металите от рудата и обработването им. Медта е била позната още от древността на хората. В историческите и археологическите музеи из България може да се видят изработени оръдия на труда, накити, части от въоръжение от мед и други метали, златни и сребърни съкровища. По обработените накити и предмети може да си направим заключение, че народите, населявали Балканския полуостров преди траки, гърци, римляни са били на високо равнище на развитие.

#### Литература:

- Барин. (2017). *Медните антични рудници Айбунар, Старозагорско*. <https://barin.blog.bg/history/2017/11/26/mednite-antichni-rudnici-aibunar-starozagorsko.1579889>
- Болгурова, А. (2014). Праисторическа селищна могила отпреди 7000 години на Старозагорските минерални бани, <https://dobrinovini.com/праисторическа-селищна-могила-отпред/>
- Бъчваров Кр., Тонкова М., Кацаров Г. (2017). *Сърнево Вкопани структури от късния неолит, ранната и късната желязна епоха и римския период*, том 1., <https://gemologia.eu/wpcontent/uploads/2021/12/Mineralogical-and-petrographic-analysis-of-malachite-containing-samples-from-a-Late-Neolithic-pit-field.pdf>
- Добив и обработка на мед и бронз през праисторията. (2009). *Сп. „Археологията днес“*, [https://ancientbg.blogspot.com/2009/01/blog-post\\_06.html](https://ancientbg.blogspot.com/2009/01/blog-post_06.html)
- История на металите*. 2022, публикувано в [russteroidoff.ru](http://russteroidoff.ru);
- Кулев Ив. (2011). *Основи на геоархеологията*, глава 9.
- Николов В. (1999). *Културно-хронологически проблеми на ранния неолит в днешна Западна България*.
- Черных, Ев. (1978). *Горно дело и металургия в древнейшей Болгарии*, София: Издателство на БАН.
- Черных Ев. (2009). *Минното дело и металургията в най-древна България*, публикувано в *Археологията днес*.

## STUDY OF THE THERMAL RADIATION OF BODIES DEPENDING ON THE GEOMETRY OF THE SURFACE AND THEIR STRUCTURE

*Plamen Savov, Stanislav Stoykov, Liubomir Mihailov, Radostin Pazderov*

*University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: psavov@mgu.bg, stoykovst@gmail.com, l.89.mihaylov@gmail.com, rpazderovov@mgu.bg*

**ABSTRACT.** According to world statistics, about a third of the energy used by people goes to heat their homes. That is why the search, development, and creation of materials with good thermal insulation properties, which are both moisture- and noise-insulating and at the same time relatively cheap, is a great challenge for scientists and engineers. The presented work discusses the results obtained from the study of the heat transfer process depending on the geometry of the surface and the structure of materials suitable for cladding. Based on Newton's equation for cooling, the values of the parameter in the exponent were calculated for different bodies with different surface roughness.

**Key words:** cooling equation, heat transfer, thermal insulation materials.

### ИЗСЛЕДВАНЕ НА ТОПЛИННОТО ИЗЛЪЧВАНЕ НА ТЕЛАТА В ЗАВИСИМОСТ ОТ ГЕОМЕТРИЯТА НА ПОВЪРХНОСТТА И СТРУКТУРАТА ИМ

*Пламен Савов, Станислав Стойков, Любомир Михайлов, Радостин Паздеров  
Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София*

**РЕЗЮМЕ.** Според световната статистика, около една трета от енергията, използвана от хората, се консумира за отопление на техните домове. Ето защо търсенето, разработването и създаването на материали с добри термоизолационни свойства, които да са и влаго-, и шумоизолиращи, и едновременно с това и сравнително евтини, е голямо предизвикателство пред учените и инженерите. В представената работа се дискутират резултати, получени от изследване на процеса на топлоотдаване в зависимост от геометрията на повърхността и структурата на подходящи за облицовка материали. На базата на уравнението на Нютон за охлаждането са пресметнати стойностите на параметъра в експонентата за различните тела с различна грапавост на повърхността.

**Ключови думи:** уравнение на охлаждане, топлоотдаване, топлоизолационни материали.

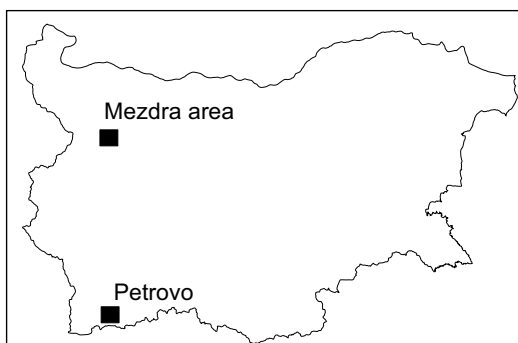
### Въведение

В публикацията се дискутират експерименталните резултати, получени в резултат на изследване на процеса на топлоотдаване на два типа скално-облицовъчни материали (варовици и мрамори), в зависимост от тяхната геометрия и текстуриране (степен на заглаждане на повърхността им).

Мраморите и варовиците се разкриват на големи площи в Южна и Западна България (мрамори) и предимно Северна България (варовици). Мраморите са широко използвани като скално-облицовъчен материал, инертен материал за гражданското и пътното строителство, както и като суровина за химическата промишленост.

Варовиците (тип „врачански камък“) са традиционен скално-облицовъчен материал.

**Предмет** на настоящите изследвания са варовиците от района на Мездра – находище „Требежа“, и мраморите от Находище „Петрово“, фиг. 1.



**Фиг. 1.** Схема на районите на находищата на варовици и мрамори

**Целта** на настоящото изследване е да се оценят свойствата на карбонатните скали като материал за съхранение на топлинна енергия, генерирана през деня от възобновяеми енергийни източници и нейното потенциално използване през нощта (Coletti et al., 2021; Фокин, 1973). В представената работа се дискутират резултати, получени в резултат на изследване на процеса на топлоотдаване, в зависимост от геометрията на повърхността и структурата на подходящи за облицовка материали. На базата на уравнението на Нютон за охлаждането са пресметнати стойностите на параметъра в експонентата за различните тела с различна грапавост на повърхността.

**Мраморът от находище Петрово** е част от птолерозойската Асеновградска група на Родопската супергрупа. Находището се намира край село Петрово Югозападна България. Мраморите са бели, снежнобели до сиви и фини до среднозърнести (Б. Петров). Те показват масивна структура и фина до едрозърнеста или гранобластна текстура. Изследваните проби са изработени от снежнобели сортове фини до среднозърнести скали (0,1 до 0,5 mm). Минералният състав на мраморите е представен от калцит (90 – 95 %) и второстепенни минерали като доломит (0 – 6 %), мусковит, плагиоклаз, титанит и рутил. Химичният състав на мраморите от находище Петрово показва съдържание на CaO (53,6 тегл. % средно при 86 анализа), MgO – 1,4 тегл. % (Петров, 1979).

Изследваните **варовици от района на с. Горна Кремена, Врачанско** са типичен представител на т.нар. кариерни варовици, ползвани за добив на скално-облицовъчен материал. Варовиците са бели до кремави, порцелановидни, плътни биодетритусни с фин до дребен псамит. Изградени са от микрит (микрозърнест калцит) в количество до



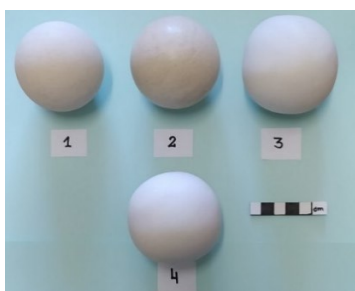
25-30% и прекристализирал микрит от матрикса до бистър микроспорит. Всред микритната маса се наблюдават сравнително равномерно разпределени алохеми в количество до 70-80%, представени от биокласти от цели, запазени фосилни останки и от заоблени организмови фрагменти: фораминифери, изградени от микрозърнест калцит с останки от бодлокожи – криноиди и схиниди, изградени от калцит, прекристализирал до монокристали, заоблени останки от мидени – гастроподни черупки, по-малко остраподни черупки. Теригенните примеси не надвишават 1%. Представени са от кварц под формата на единични монокристални зърна или агрегати от 2-3 зърна. Размерите им са в рамките на фин псамит (0,06-0,1 mm). Химичният състав на варовиците от района на Мездра показва следното съдържание на основни оксиди: CaO 46,06 тегл. %, SiO<sub>2</sub> 19,27 тегл. % и MgO 0,29 тегл. %. Някои от основните физични свойства са специфично тегло: 2,71 g/cm<sup>3</sup>, обем на порите: 16,61 %, водопоглещане: 3,2 %, Таблица 1.

Таблица 1. Физикомеханични показатели на изследваните варовици и мрамори

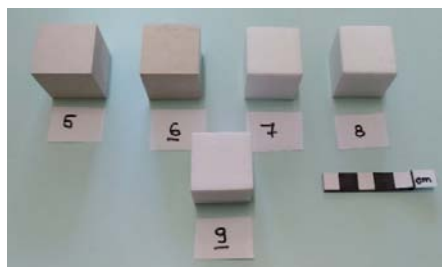
Параметър	Мрамор	Варовик
Специфична плътност	2.74	2.71
Обемна плътност	2.68	2.26
Обем на порите [%]	2.47	16.61
CaO [wt. %]	53.6	46.06
MgO [wt. %]	1.4	0.29
SiO <sub>2</sub> [wt. %]		19.27

### Материали и изследване на пробните тела

За да се установи зависимостта на коефициента на топлопреминаване *k* от вида на материала, формата и неговата повърхност, експериментите са проведени на кубична и сферична форми от варовик и мрамор, които са с различна степен на изглаждане (степен на грапавост) на повърхността им – фино шлифовани, грубо шлифовани и набраздени (фиг. 2, 3 и 4, таблица 2). Пробните тела са с различна геометрия, като сферите са с по-голям обем от кубчетата.



Фиг. 2. Пробни тела – сфери от варовик и мрамор - фино и грубо шлифовани



Фиг. 3. Пробни тела – кубчета от варовик и мрамор - фино и грубо шлифовани



Фиг. 4. Пробни тела – кубчета и сфери от варовик и мрамор - набраздени

Таблица 2. Пробни тела – кубчета и сфери за изследване на процеса на топлоотдаване

№	материал	Степен на изглаждане
1, 5	варовик	грубо шлифован - limestone 1
2, 6	варовик	фино шлифован - limestone
3, 9	мрамор	грубо шлифован – marble 1
4, 7, 8	мрамор	фино шлифован - marble
10, 11	варовик	набразден - limestone 2
12, 13	мрамор	набразден – marble 2

### Резултати и дискусия

Законът на Нютон за охлаждането е основният закон, който описва скоростта на пренос на топлина от тялото към околната среда чрез радиация. Скоростта на охлаждане на дадено тяло е правопропорционална на температурната разлика тяло-околна среда и намалява експоненциално с времето (Frank, 2007).

Законът на Нютон за охлаждането е специален случай на закона на Стефан-Болцман.

$$T(t) = T_A + (T_H - T_A)e^{-kt}$$

където,

*T(t)* - температура в момент *t*;

*T<sub>A</sub>* - температура на околната среда;

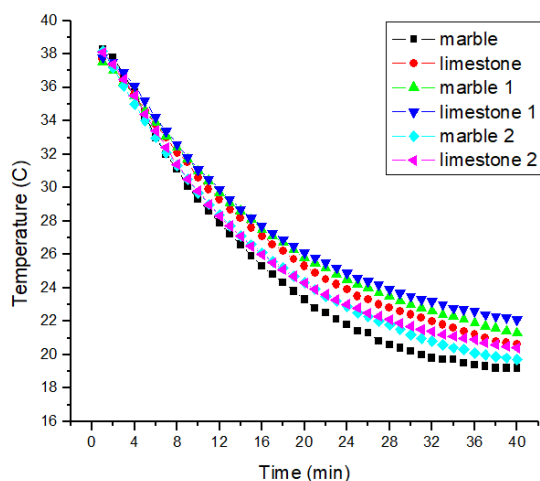
*T<sub>H</sub>* - температура на нагретия обект;

*k* - е положителната константа и *t* е времето.

В закона на Нютон за охлаждане, *k* е константа на пропорционалност, известна като коефициент на топлопреминаване, определен от повърхността на охлаждащия се обект и материалите на обекта и околната среда. В случая се обсъжда коефициента на топлопреминаване *k* в уравнението на закона на Нютон за охлаждане. *K* е константата, която зависи от материала, площта на повърхността и формата, т.е. промяната на материала, повърхността или формата води до промяна на константата *k* в закона на Нютон за охлаждането.

За да бъде определена стойността на *k*, е необходимо да се изследва функцията на охлаждане на даденото тяло във времето.

За целта образецът се нагрява равномерно в термокамера, след което върху него се прикрепва термодатчика на термолотер. Термолотерът записва данните за температурата през зададен интервал (в случая през 1 min) след което, на базата на експерименталните данни се изчертава и съответната графика на процеса на охлаждане (фигури 5 и 6).



Фиг. 5. Резултатите от изследване на процеса на охлаждане на кубчетата с различна степен на грапавост

Вижда се, че при гладка повърхност кубчето мрамор се охлажда по-бързо от варовика. Това се дължи на факта, че мраморът има около 3 - 4 пъти по-голяма топлопроводност от тази на варовика.

**Мраморът** е с по-високо обемно тегло, т.е. по-голяма плътност и по-нисък % обем на порите. По-високият процент на порестост при **варовика** обуславя и по-високия процент въздух, съдържащ се в него. Въздухът е един от най-добрите топлоизолатори и поради това варовикът отдава топлината с по-ниска скорост, в случая – по-ниска в сравнение със скоростта на топлоотдаване на мрамора.

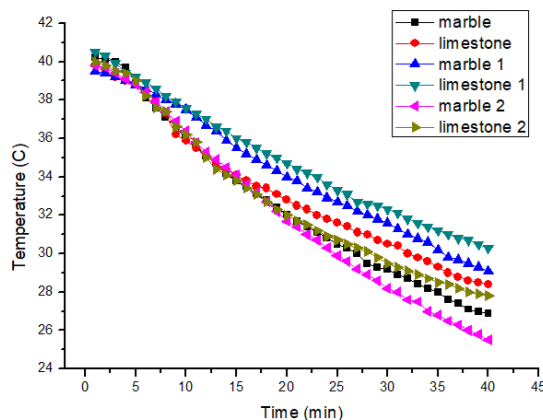
Върху скоростта на топлоотдаване явно оказва влияние и **степената на хомогенност и изотропност**, които доста се различават при двата типа скали.

При седиментните скали, в частност при изследваните образци от **варовик**, се наблюдава текстурираност, успоредна на плоскостта на напластяване, като изотропност по отношение на скоростта на топлоотдаване се проявява в направлението, перпендикулярни на напластяването (Бабаев и др., 1987; Вахромеев и др., 1997).

**Мраморите** са преобладаващо мономинерални агрегати, в чийто състав над 90% присъстват изометрични зърна на прекристализирал калцит. Това обуславя и по-високата степен на изотропност, в сравнение с тази на варовиците (Кобранова, 1986;. Ржевский и Новик, 1984; Фоменко, 2011).

Интересно е да се отбележи, че първоначално, при определена степен на грапавост, скоростта на охлаждане на образците намалява, като при по-нататъшно увеличение на грапавостта (и съответно на излъчващата повърхност) скоростта на охлаждане започва да нараства (фиг. 5). Наблюдава се също така и намаляване на разликата в скоростите на охлаждане между двата вида образци, което би могло да се дължи на включване и на конвективния начин на охлаждане, освен радиационния.

При сферичните образци се наблюдава подобна зависимост на охлаждането. Скоростта на охлаждане на мраморното кълбо е по-висока от тази на кълбото от варовик (фиг. 6). Този процес се наблюдава и при различните степени на грапавост. Тук е интересно да се отбележи, че кривите на охлаждане при грапава повърхност на сферите започват да се отклоняват от експоненциалния профил, който се генерира от формулата на Нютон за охлаждането.



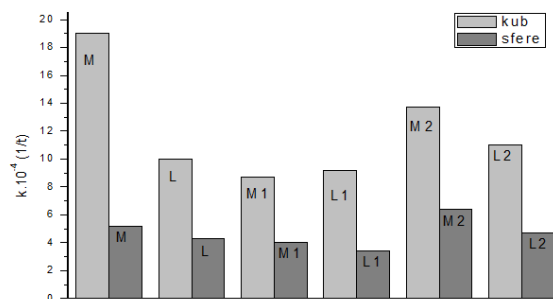
Фиг. 6. Резултатите от изследване на процеса на охлаждане на сфери с различна степен на грапавост

За да се пресметне параметъра **k** за всеки един от експерименталните образци, е необходимо да се реши уравнението на Нютон за охлаждането спрямо **k**.

След логаритмуване и кратки преобразования уравнението придобива вида:

$$k = -\frac{1}{t} \left( \frac{T(t) - T_A}{T_0 - T_A} \right)$$

След като се заместят стойностите на температурите за всеки един образец и за всеки експеримент за **k** на кубчетата и сферите се получават стойности – представени на фиг. 7.



фиг. 7. Стойности на параметъра **k** при всеки един от изследваните образци

От фиг. 7 се вижда, че и при двете геометрични форми на образците стойностите на параметъра **k** за мрамора са по-големи в сравнение с тези на варовика.

Освен това, стойността на параметъра **k** е значително по-голяма при малките кубчета в сравнение с тази на по-големите по обем сфери.

Интересно е да се отбележи, че тенденцията на промяна на параметъра **k** с нарастване на грапавостта и за двете форми и двата материала има еднакво поведение, като се наблюдава първо един минимум в стойностите при първата степен на грапавост (фигури 5 и 6).

## Заклучение

От получените експериментални резултати и техния анализ може да се заключи следното:

- Независимо от формата и грапавостта на тялото, при еднаква повърхност, мраморния образец се охлажда радиационно с 2 – 3 пъти по-голяма скорост от варовика;
- Първоначално, при определена степен на грапавост скоростта на охлаждане на образците намалява, като при по-нататъшно увеличение на грапавостта (и съответно на излъчващата повърхност) скоростта на охлаждане започва да нараства;
- Тенденцията на промяна на параметърът  $k$  с нарастване на грапавостта и за двете форми и двата материала има еднакво поведение, като се наблюдава първо един минимум в стойностите при първата степен на грапавост.

Благодарности: на Георги Цветков, управител на фирма „Председник“ ООД, за оказаното съдействие при предоставяне и обработка на материалите – пробни тела, необходими за извършване на експериментите.

## Литература

- Бабаев, В. В., Будымка В. Ф., Сергеева Т. А. (1987). *Теплофизические свойства горных пород*. М., Недра, 157 стр.
- Вахромеев, Г. С., Ерофеев Л. Я., Канайкин В. С., Номоконова Г. Г. (1997). *Петрофизика*, Томск.
- Кобранова, В. Н. (1986). *Петрофизика*. М., Недра, 392 стр.
- Ржевский, В. В., Новик, Г. (1984). *Основы физики горных пород*. Москва, Недра, 360 стр.
- Фокин, К. (1973). *Строительная теплотехника ограждающих частей зданий*. Стройиздат, Москва, 1973, 289 стр.
- Фоменко, Н. (2011). *Физика горных пород*. Новочеркасск, 144.
- Coletti, Ch., Al. Borghi R. Cossio, M. Chiara Dalconi, Giorgia Dalla Santa, Luca Peruzzo, Raffaele Sassi, Arianna Vetterlo, Antonio Galgaro. (2021). A multi-scale methods comparison to provide granitoid rocks thermal conductivity. *Construction and Building Materials* 304 (2021) 2-13.
- Frank, I. (2007). *Fundamentals of heat and mass transfer*. John Wiley & Sons. 2007, 1070 p.

## DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL MODELS OF GROUNDWATER CONTAMINATION FROM TECHNOLOGICAL SOURCES - A METHODOLOGICAL APPROACH

*Nikolay Stoyanov*

*University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia, e-mail: nts@mgu.bg*

**ABSTRACT.** The study proposes a general methodological approach for mathematical modelling of groundwater contamination from sources, such as mining sites, waste dumps, agricultural fields, and large engineering facilities. Key pollutants have been carefully selected for detailed investigation in quantitative assessments and predictions. The boundaries and components of the migration field marking the framework of the model area for each specific object are defined. A general modelling concept is presented, encompassing the complete substance transport mechanism - convective-diffusion transport. The latter includes considerations of sorption-desorption, mechanical dispersion, irreversible elimination (natural decay and sedimentation), and mixing. Brief introductions to key modelling tools for contaminant movement through saturated and unsaturated media, such as the VS2DI, Modflow, and MT3D-MS computer codes, are also provided.

**Keywords:** hydrogeological modelling, mass transport models, groundwater contamination, ecology.

### МЕТОДИЧЕН ПОДХОД ЗА РАЗРАБОТВАНЕ НА МАТЕМАТИЧЕСКИ МОДЕЛИ НА ЗАМЪРСЯВАНЕТО НА ПОДЗЕМНИ ВОДИ ОТ ТЕХНОГЕННИ ИЗТОЧНИЦИ

*Николай Стоянов*

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

**РЕЗЮМЕ.** Предложен е общ методичен подход за математическо моделиране на замърсяването на подземни води от минни обекти, депа за отпадъци, селскостопански обекти, големи инженерни съоръжения и др. Направен е аргументиран избор на ключови замърсители, които е необходимо да бъдат изследвани при количествени оценки и прогнози. Дефинирани са границите и компонентите на миграционното поле, маркиращо рамката на моделната област за всеки конкретен обект. Представена е обща концепция за моделиране, включваща и описание на механизма на пренос на вещество в пълния му вид – конвективно-дифузионен пренос, с отчитане на процесите на сорбция-десорбция, механична дисперсия, необратимо елиминиране (естествен разпад и утаяване) и смесване. Накратко са представени и основните инструменти за моделиране движението на замърсители в ненаситена и наситена среда - компютърни кодове VS2DI, Modflow и MT3D-MS.

**Ключови думи:** хидрогеоложки моделиране, миграционни модели, замърсяване на подземните води, екология.

### Въведение

Като основен инструмент за изследване и прогнозиране на техногенното замърсяване на подземните води през последните десетилетия в световната практика се наложиха компютърните математически модели. Обект на тези модели е движението на различни по вид и генезис замърсители в подповърхностното пространство от различни повърхностни и подземни източници – минни обекти, депа за отпадъци, селскостопански обекти, големи инженерни съоръжения и др. При тяхното разработване се отчитат конкретните природни и техногенни условия в изследваната част от хидрогеоложката структура, диферинцирано или по-обобщено в ненаситената и водонаситената зона. В зависимост от поставените цели моделите имат различен пространствено-времеви обхват и съответстващ на изследваните замърсители механизъм за описание на миграционните процеси. Разнообразни са и възможностите за използване на различен софтуер за симулиране на едномерни, двумерни и тримерни процеси в ненаситена и водонаситена среда. През годините в хидрогеоложкото моделиране са използвани с различен успех много компютърни програми. На база на постигнатите резултати при моделиране на процесите във водонаситена среда, особено ефективни са компютърните програми Modflow, Modpath и MT3D-MS, включени в стандартните софтуерни продукти GMS, Visual Modflow, Groundwater Vistas, PMWIN, Modflow-USG и др. (Anderson et al., 2015; Стоянов, 2019). В повечето от тези продукти вече има и модули за моделиране миграцията в ненаситената зона, но за по-сложни модели те изискват доста по-големи

хардуерни ресурси. Ето защо за целта е препоръчително да се ползват някои от утвърдените в практиката компютърни програми за среди с променлива водонаситеност като Hydrus (Šimůnek et al., 2008), VS2DI (Hsieh et al., 2000) и др. Това е един много удобен подход за моделиране на замърсяването на подземните води от повърхностни източници. При него миграционната задача в ненаситената зона се решава с едномерни и/или двумерни модели, съставени с някои от посочените специализирани програми и на базата на получените решения посредством Modflow и MT3D-MS да се разработят тримерни модели на последващото разпространение на замърсителите във водоносните пластове.

Общи методически подходи и указания за съставяне на модели на замърсяването на подземните води, както и голям брой илюстративни практически примери могат да се намерят не само в ръководствата към съответния софтуер, но и в редица тематични книги, учебници, монографии и други публикации (Ostrom et al., 2016; Antonov et al., 2019; Antonov et al., 2020; Dahan 2020; Gerginov et al., 2020; Стоянов, 2015, 2019). В настоящата статия, въз основа на тридесетгодишния опит на автора в тази сфера и съобразно действащата у нас нормативна база, са представени някои важни стъпки, конвенции и инструменти при съставянето на модели на замърсяването на подземни води от техногенни източници. Разгледани са въпроси, относно избора на ключови замърсители, дефинирането на границите и елементите на миграционното поле, последователността на работа при съставянето на моделите, процесите за описание преноса на вещество и математическия апарат, използван в VS2DI, Modflow и MT3D-MS.

## Избор на ключови замърсители

Математическите модели на замърсяването на подземните води не е нужно да включват изследване на поведението на всички замърсители в източника на замърсяване. Макар и привлекателен като възможност, екстензивният подход на изследване е свързан с огромни разходи на средства, без това да се компенсира с по-високо качество на крайните резултати. Същевременно, не винаги е възможно и да се посочат конкретни данни за вида и концентрациите на целия букет от замърсители в източника. Ето защо, за всеки конкретен източник от големия брой замърсители се избират два или по-рядко повече ключови замърсители, по отношение на които се правят количествени екологични оценки и прогнози чрез проиграване на различни консервативни сценарии. Главни критерии при този избор са: (i) концентрацията на замърсителя в източника на замърсяване – емитера; (ii) подвижността на замърсителя в подповърхностното пространство и подземните води; (iii) способността на замърсителя да влияе върху киселинността и окислително редуцирания потенциал на средата, респ. да генерира промени на геохимичните бариери; (iv) вредното въздействие върху човешкото здраве и околната среда. Последният критерий визира не само прякото въздействие на замърсителя като особено опасен или много вреден, но и неговата роля на катализатор на физикохимични процеси, които биха влошили общата екологична обстановка.

Основните задачи на моделните изследвания е посредством компютърни симулации да се направят количествени оценки и прогнози за:

- Максималния обхват на замърсяването около източника, респ. на пространствените граници на зоната на въздействие върху елементите на околната среда, в това число върху подземните и повърхностните води.
- Границите на най-интензивно замърсяване с токсични замърсители (например с тежки метали, радионуклиди и др.) около източника.

Така дефинираните задачи до известна степен определят и избора на ключови замърсители за всеки конкретен обект. Първата задача предполага моделите да симулират поведението на практически несорбируеми и съдържащи се в големи количества замърсители. Такива са например хлоридните йони (Cl), сулфатните йони (SO<sub>4</sub>), пестициди, инсектициди, някои органични вещества от типа на ТСЕ, РСЕ и др. При втората задача е уместно да се симулира поведението на по-подвижните тежки метали, тъй като те са определящи маркери за детерминиране на зоните с най-интензивно замърсяване около източниците. Например, такива са някои от много токсичните метали и металоиди като кадмий (Cd), арсен (As) и др. При радиоактивен източник като ключови замърсители се определят радионуклиди, имащи висока концентрация в източника, голяма подвижност във филтрационна среда и възможно по-голям период на полуразпад. Подобен избор се прави и при наличие на органични, саморазпадащи се вещества в източника. Около източници с биоразградими отпадъци като депа за битови отпадъци, ферми и пр., основен индикатор са амониите йони (NH<sub>4</sub>).

## Обхват и компоненти на миграционното поле

Моделните изследвания е необходимо да обхващат цялата площ и всички компоненти на миграционното поле, включващо тази част от подповърхностното пространство, където се очаква да мигрират постъпилите от източника замърсители. В план, полето заема територията от източника на замърсяване (емитера) до първия приемник (реципиент). По дефиниция като такъв се приема най-близката река, дере или повърхностен водоем, в който се дренира замърсения подземен поток. В разрез миграционното поле обикновено включва три основни компонента:

- инженерните защитни бариери в основата на източника (бетонни фундаменти, бетонни облицовки, глинести екрани, геомембрани, геосинтетични облицовки и други защитни елементи, препятстващи прякото навлизане на замърсители в подповърхностното пространство);
- ненаситената зона под източника на замърсяване, включваща пространството от неговата основа или от долнището на най-дълбоко разположената инженерна бариера до нивото на подземните води, т.нар. зона на аерация. (*Забележка: Формално инженерните бариери са част от ненаситената зона*);
- водонаситената част от подповърхностното пространство, включваща водоносни и разделящи пластове и зони от състава на потенциално застрашения водоносен комплекс.

Ще отбележим, че трите компонента са обект на разглеждане при моделиране на повърхностни и в различна степен защитени източници на замърсяване. За обекти с подземни източници, разположени под нивото на подземните води, моделите обхващат единствено водонаситената част от подповърхностното пространство. В последния случай инженерните бариери се разглеждат като елемент от водонаситената зона.

## Обща схема за провеждане на моделните изследвания

Моделните изследвания за оценка и прогнозиране на миграцията на избрани ключови замърсители, постъпващи в подповърхностното пространство при различни хидрогеоложки условия и от различни по вид техногенни източници е уместно да бъдат провеждани по една обща схема, засягаща специфичните характеристики на източника, параметрите на природната среда, последователността и съдържанието на изчислителните процедури, използвания софтуер, визуализацията на резултатите и др. Целта е към всеки конкретен обект да се прилага един общ унифициран подход, осигуряващ равно по достоверност доближаване на моделите до реалните условия и процеси, както и по-добра възможност за систематизация, анализ и интерпретация на получените за различните обекти резултати. Разбира се, предложената обща схема може да бъде опростявана или допълвана, в зависимост от важността на съответното изследване.

Главните изходни позиции в тази схема са следните:

- Условията за миграция на замърсителите през ненаситената зона и инженерните бариери (при наличие на такива) се симулират посредством двумерни (2D) модели, а разпространението им в подземните води – с тримерни (3D) модели. Получените двумерни решения



- се използват като входни данни при разработването на тримерните модели. Възможно е да се разработят и по-сложни 3D модели, които включват всички елементи на миграционното поле, но те изискват многократно по-голям компютърен ресурс, особено при изготвянето на дългосрочни прогнози. Същевременно, разделянето на процесите в ненаситената и водонаситена среда не намалява априори точността на моделните решения, дори напротив – прави моделите по-устойчиви и дава възможност за по-прецизирани анализи и прогнози.
- Моделната област в двумерните модели обхваща разрезите, преминаващи през централната част на източника – в направление по посока на подземния поток. Моделната област в тримерните модели обхваща цялата територия от източника до първия реципиент на замърсения подземен поток.
  - Хидрогеоложките единици и инженерните бариери се пресъздават в пълно съответствие с техните основни характеристики: геометрични – дебелина, дължина или площ на разпространение; физични – плътност, порестост; филтрационни – коефициент на филтрация, коефициент на водоотдаване; миграционни – коефициенти на разпределение, дисперсивност и молекулярна дифузия. В зоната на аерация допълнително са зададени и специфичните за ненаситената среда параметри: естествена влажност, коефициент на влагопроводност и връзката между всмукващия потенциал и влажността.
  - Вертикалното инфилтрационно подхранване се определя в съответствие с климатичните, геоложките и техногенните условия в района на изследвания обект.
  - Механизмът на масопренасяне се задава във възможно най-пълния му вид: конвективно-дифузионен пренос, съпроводен с процеси на сорбция/десорбция, механична дисперсия, необратимо елиминирание (радиоактивен разпад, утаяване), смесване и пр.
  - Приемат се и някои опростяващи моделите разумно консервативни допускания: (i) инфилтрационният поток през инженерните бариери и в площта извън границите на източника е равномерно разпределен; (ii) концентрацията на замърсителите е променлива, функция на прилаганата технология и времето от началото на експлоатацията на обекта, хомогенно разпределена по участъци в източника.
  - С моделите се симулира миграцията на предварително избраните по-силно и по-слабо подвижни ключови замърсители, които дават цялостна представа за възможното разпространение на постъпилите от източниците замърсители в подпочвено пространство и подземните води. Максималният обхват на замърсяването се маркира от практически несорбируемите и най-подвижни замърсители като Cl, SO<sub>4</sub> и др., а най-засегнатата зона се очертава от силно сорбируемите и много слабо подвижни замърсители, например NH<sub>4</sub> или тежките метали As, Cd и много други.
  - Тъй като абсолютната концентрация на замърсителите в източника обикновено е неизвестна, резултатите от моделните изследвания е уместно да се представят като „относителна концентрация“, т.е. отношение на „текущата“ концентрация C<sub>t</sub> в даден момент t<sub>i</sub> и място x<sub>i</sub>, y<sub>i</sub>, z<sub>i</sub> към началната (входната) концентрация C<sub>0</sub> на съответния ключов замърсител. Разбира се, ако C<sub>0</sub> е измерима и точно определена величина е по-правилно

в моделите да се работи и резултатите да се получават в абсолютни концентрации.

- Моделните изследвания най-често целят изготвянето на средносрочни и дългосрочни прогнози, съответно за период от 10 или 100 години. При радиоактивни източници прогнозните изчисления се правят за период от 1000 години и повече. Препоръчително е прогнозите, особено ако са направени преди съществуването на източника, да бъдат актуализирани след калибриране на моделите на базата на мониторингови данни.
- Резултатите от моделите се представят посредством таблици, графики, карти и блок-диаграми на концентрационното поле в различни моменти от време. За по-добро илюстриране на протичащите миграционни процеси се записват като компютърни симулации в подходящ за популяризация формат.

### Механизъм за пренос на замърсители в подповърхностното пространство и подземните води

Съществуват две основни форми на пренос на вещество, респ. и на замърсители в подповърхностното пространство и подземните води:

- *Дифузионен пренос.* Обуславя се от разликата в концентрациите на дадения компонент или замърсител в течната фаза в различни точки от пласта. Посоката и интензивността на процеса не зависят от посоката и скоростта на филтрационния поток.
- *Конвективен пренос.* Реализира се от филтрационния поток. Протича под формата на заместване на чистите пластови води, в които се разпространява замърсителя, с подземни води, в които той се съдържа.

Двете форми на масопренос се проявяват както в зоната на аерация (ненаситената среда), така и във водоносните пластовете. Относителната тежест и значение на едната или другата форма е различна и зависи от начина и скоростта на движение на водата.

Разпространението на замърсителите в подповърхностното пространство се съпътства и в различна степен зависи от следните по-важни физични и физикохимични процеси:

- Сорбция (задържане) на разтвореното вещество в твърдата фаза, зависеща както от вида на замърсителя, така и от свойствата на самата среда (зърнометрия, минерален състав и пр.). Процесът е обратим и обикновено протича по линейна зависимост. Има много силно влияние върху подвижността на различните замърсители, напр. ако несорбируемите се движат със скоростта филтрационния поток, то силно сорбируемите са многократно по-бавни.
- Механична дисперсия, зависеща главно от скоростта на подземния поток и характеристиките на твърдата фаза. При ниски скорости нейният ефект е пренебрежим.
- Необратимо елиминирание или извеждане на вещество от течната фаза в резултат на процес на необратимо утаяване, радиоактивно и хидролитично разпадане. Тези процеси водят единствено до намаляване на концентрациите на замърсителите във времето, но не ограничават тяхното пространствено разпространение.

В математическите уравнения съпътстващите процеси се описват количествено със съответните миграционни характеристики на твърдата фаза съобразно специфичните свойства на различните замърсители, по-важните от които са коефициент на разпределение  $K_D$  (респ. забавящ фактор  $R_f$  или сорбционна порестост  $n_s$ ), коефициент на хидродисперсия  $D$ , коефициент на разпадане  $\gamma$  и др. При радиоактивното и хидролитичното разпадане параметърът  $\gamma$  е пряко свързан с периода на полуразпад на различните радионуклиди, пестициди, инсектициди и пр.

Същевременно има много големи различия в движението на водите и съдържащите се в тях замърсители в зоната на аерация и във водоносните пластове, където има пълно водонасищане. В първия случай става дума за влагопренасяне – просмукване на инфилтрирали се от повърхността води, съпътствано от действие на капилярни сили, докато във втория случай е налице филтрационен поток, обусловен от хидравличните градиенти във водоносния пласт. Различно е и математическото описание на двата процеса, както и инструментите за тяхното моделиране.

## Инструменти за разработване на модели на замърсяването на подповърхностното пространство и подземните води

### Моделиране на миграцията през инженерните бариери и зоната на аерация. Компютърна програма VS2DI.

Математическото моделиране на миграцията през инженерните бариери и зоната на аерация може да се извърши посредством програмния пакет VS2DI, който е един от най-ефективните софтуерни продукти за моделиране на процесите в среда с променлива водонаситеност. Той е разработен от Геоложката служба на САЩ (USGS). Първоначалната версия на програмата VS2D моделира влагопреноса и преноса на вещество в среда с променлива водонаситеност (Lappala et al., 1987; Healy, 1990). Впоследствие на базата на първата версия е разработен и модул за симулиране на преноса на топлина (Healy and Ronan, 1996), а след няколко години е разработен и модул с графичен интерфейс (Hsieh et al., 2000). Последната версия на програма VS2DI включва три основни модула: (1) VS2DTI – за моделиране на преноса на вещество, респ. на миграцията на замърсителите; (2) VS2HI – за моделиране на енергийния пренос, включително и процеси на топлинно замърсяване; и (3) VS2DPOST – за визуализация на резултатите от предходните модули, във формат на вертикални карти или компютърна анимация. Алгоритъмът на програмата използва числен модел по крайни разлики при решаване на уравнението на инфилтрационния поток, уравнението на масопреноса и уравнението на топлопренасяне (Healy & Essaid, 2012).

Първото уравнение, определящо функцията на потока в ненаситена среда, има вида:

$$d(\theta(h) + sS_s H)/dt = \nabla \cdot \bar{k}^*(h, T) \cdot \nabla H + q, \quad (1)$$

където:  $\theta$  – обемна влажност, без дименсия;  $h$  – всмукващ потенциал,  $L$ ;  $s$  – водонаситеност, без дименсия;  $S_s$  – коефициент на специфично водоотдаване,  $L^{-1}$ ;  $H$  – общ хидровличен напор,  $L$ ;  $\nabla$  – диференциален оператор

$\partial/\partial x + \partial/\partial y + \partial/\partial z$ ,  $L^{-1}$ ;  $\bar{k}^*(h, T)$  – тензор на коефициента на влагопроводност (коефициент на филтрация при непълно водонасищане), зависещ и от температурата при моделиране на топлинен пренос,  $LT^{-1}$ ;  $q$  – разход на единица обем, отчитащ различните източници или стокове,  $T^{-1}$ ;  $t$  – време,  $T$ .

При съставянето на модели на инфилтрационния поток връзките на коефициента на влагопроводност и всмукващия потенциал с обемната влажност се моделират посредством функциите, предложени от van Genuchten, Brooks & Corey, Haverkamp et al., Rossi & Nimmo или чрез таблични стойности (Healy & Essaid, 2012). Тези зависимости се съдържат в алгоритъма на програмата и се задават от началното меню. Началните хидравлични условия в моделите се специфицират посредством статичен равновесен профил или със задаване на стойности на всмукващия потенциал и влагонасищането. Граничните условия се дефинират като по външните граници на моделната област се задават стойности на всмукващия потенциал или общия напор, единичния разход към/от моделната област, сумарния поток, евапорацията, както и възможно протичане като изчислима променлива, отсъствие на поток и др.

Второто уравнение, описващо движението на замърсители в частично водонаситената среда може да се запише като:

$$d(\theta(h) + sS_s H)/dt = \nabla \cdot \theta \bar{D}_h \cdot \nabla c - \nabla \cdot \theta \bar{v} c + q', \quad (2)$$

където:  $c$  – концентрация на замърсителя,  $ML^{-3}$ ;  $\bar{D}_h$  – тензор на хидродинамична дисперсия,  $L^2T^{-1}$ ;  $\bar{v}$  – вектор на скоростта на потока,  $LT^{-1}$ ;  $q'$  – член, описващ прихода / разхода на вещество в / от разтвора,  $ML^{-3}T^{-1}$ .

Първият член от дясната страна на уравнение (2) отразява хидродинамичната дисперсия, включваща механичната дисперсия и молекулярната дифузия. Вторият член представлява дивергенцията на конвективния поток. Този член отчита промяната на концентрацията на разтвора, дължаща се на преноса на вещество с филтрационния поток. Членът  $q'$  отразява процесите, обуславящи постъпването или напускането на веществото в течната фаза – сорбция, комплексобразуване, утаяване, радиологичен разпад, смесване и др. Тези процеси се симулират по два начина: (1) разтворената маса се въвежда в или извежда от моделната област посредством задаване на определена концентрация на замърсителя в зададения по границата входящ или изходящ поток; (2) изменението на концентрацията на замърсителя се симулира посредством изотермите на Henry, Freundlich или Langmuir, с които се описват химическите реакции в течната фаза или реакциите между течната и твърдата фаза (Healy, 1990).

Третото уравнение, с което се симулира конвективно-дисперсионния пренос на топлина има подобен на предшестващото уравнение (2) вид:

$$d(\theta C_w + (1 - n)C_s)T/dt = \nabla \cdot \theta C_w \bar{D}_h \cdot \nabla T - \nabla \cdot \bar{k}_T(\theta) \cdot \nabla T - \nabla \cdot \theta C_w \bar{v} T + q', \quad (3)$$

където:  $C_w$  – топлинен капацитет на водата,  $ML^2\theta^{-1}T^{-2}$ ;  $n$  – порестост, без дименсия;  $C_s$  – топлинен капацитет на

твърдата фаза,  $ML^2\theta^{-1}T^{-2}$ ;  $\overline{k_T}$  – тензор на коефициента на топлопроводност,  $MLT^{-3}\theta^{-1}$ .

Подробности относно компютърните модули и начина за разработване на двумерни модели са дадени в Healy (1990), Healy and Ronan (1996), Hsieh et al. (2000) и диалоговите помощни модули на програма VS2DI.

### Моделиране на миграцията във водонасните пластове. Компютърни програми Modflow и MT3D-MS.

Създаването на модели на миграцията на замърсители във водоносните пластове включва решаването на две основни задачи – филтрационна и миграционна. Първата е свързана с определяне разпределението на напорите, скоростите и градиентите на филтрационния поток в моделната област. Въз основа на получената пиезометрична структура се решава и втората задача – същинското моделиране на миграционните процеси.

За решаване на филтрационната задача при прости хидрогеоложки условия се прилагат аналитични методи, основани на съществуващите решения на уравненията, описващи едномерната или двумерната филтрация. При по-сложни водоносни структури, коректното решение изисква разработването на тримерни числени модели. Понастоящем, най-използваната за тази цел компютърна програма е Modflow (Harbaugh, 2005; Anderson et al., 2015; Стоянов, 2019). В нея по метода на крайните разлики е реализирано едно апроксимационно решение на основното диференциално уравнение на филтрацията, което най-често се записва във вида (Harbaugh, 2005):

$$\frac{\partial}{\partial x} (k_x \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (k_y \frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (k_z \frac{\partial h}{\partial z}) - W = S_S \frac{\partial h}{\partial t}, \quad (4)$$

където:  $k_x$ ,  $k_y$  и  $k_z$  – коефициент на филтрация по осите  $x$ ,  $y$  и  $z$ ,  $LT^{-1}$ ;  $h$  – хидравличен напор,  $L$ ;  $W$  – разход на единица обем, отразяващ притока или оттока от различни източници или стокове,  $T^{-1}$ .

В програма Modflow непрекъснатата среда се заменя с краен брой дискретни в пространството и времето точки, а частните производни се заменят с изрази, изчислени въз основа на различията в стойностите на напора в тези точки. Този процес води до система линейни уравнения, чието решаване дава стойностите на напора в определени точки и към определени моменти. Получените стойности представляват апроксимация на променящото се във времето разпределение на напорите, които би дало аналитичното решение на уравнение (4).

При съставяне на филтрационен модел водоносната структура се дискретизира пространствено чрез мрежа от клетки. Във всяка клетка филтрационните свойства са постоянни. Затова при дефиниране на границите между пластове и зони с различни свойства точността расте с намаляване на стъпката на дискретизация. Размерът на стъпката влияе и на точността на решението, особено в участъци с висок напорен градиент. Тъй като малкият размер, респ. по-големият брой клетки се лимитира от изчислителните възможности и паметта на компютъра, обикновено се търси компромис с използване на неравномерни мрежи. Общото време за симулация се разделя на времеви интервали – стрес периоди и времеви стъпки. Стрес периодите са времеви интервали, в чиито граници външните въздействия върху водоносната

структура (реки; дренажи; кладенци; инфилтрационно подхранване; и др.) остават постоянни.

За решаване на миграционната задача се използват аналитични и числени решения на уравненията, описващи миграционния процес. Аналитични решения могат да бъдат изведени само в случай, че миграцията протича в прости условия и източниците на замърсяване са точкови. При по-сложна хидрогеоложка обстановка и площни източници е препоръчително да се ползват тримерни миграционни модели, съставени с широко прилаганата в практиката компютърна програма MT3D-MS (Zheng & Wong, 1999; Zheng & Bennett, 2002; Anderson et al., 2015; Стоянов, 2019). В нея се използва числено решение на основното диференциално уравнение на тримерната миграция, което може да се представи във вида (Zheng & Wong, 1999):

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} (D_{ij} \frac{\partial c}{\partial x_j}) - \frac{\partial}{\partial x_i} (u_i c) + q_s/n_0 c_s + \sum_{k=1}^N R_k, \quad (5)$$

където:  $c$  – концентрация на замърсителите в подземните води,  $ML^{-3}$ ;  $x_i$  – разстояние по съответната координатна ос,  $L$ ;  $D_{ij}$  – тензор на хидродинамична дисперсия,  $L^2T^{-1}$ ;  $u_i$  – действителна скорост на подземните води,  $LT^{-1}$ ;  $q_s$  – разход на единица обем, отчитащ притока или оттока от различни източници или стокове,  $T^{-1}$ ;  $c_s$  – концентрация на замърсителите във влизащите или напускащите през различните източници или стокове водни количества,  $ML^{-3}$ ;  $n_0$  – активна порестост, без дименсия;  $R_k$  – член, отчитащ химичните взаимодействия,  $ML^{-3}T^{-1}$ .

Предполагайки, че равновесието в химичните реакции се контролира само от процеси на сорбция и необратими реакции от първи ред (разграждане, разпад), след известни преобразувания, уравнение (5) може да се запише като

$$R_f \frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} (D_{ij} \frac{\partial c}{\partial x_j}) - \frac{\partial}{\partial x_i} (u_i c) + q_s/n_0 c_s - \gamma(c + \rho_b/n_0 \bar{c}), \quad (6)$$

където:  $\bar{c}$  – концентрация на замърсителите, сорбирани от твърдата фаза,  $MM^{-1}$ ;  $\rho_b$  – обемна плътност,  $ML^{-3}$ ;  $\gamma$  – коефициент на необратимо елиминиране,  $T^{-1}$ ;  $R_f$  – забавящ фактор, който се определя от израза

$$R_f = 1 + (\rho_b/n_0) \cdot (\partial \bar{c} / \partial c). \quad (7)$$

Уравнение (5) описва движението на замърсители в пореста среда с отчитане на конвективния пренос, дисперсията и някои химични взаимодействия със средата – равновесна линейна или нелинейна сорбция, необратимо елиминиране от първи порядък или биодеградация. При създаването на MT3D-MS е използвана подобна на програма Modflow модулна структура, за да се интегрира лесно с нея и да я ползва за изчисляване елементите на подземния поток. След като филтрационната задача е решена, MT3D-MS моделира движението на замърсителите като използва изчислените и записани с Modflow напори. При съставянето на миграционните модели върху концентрационното поле е възможно да се симулира въздействието на външни за системата източници/стокове (реки, кладенци, дренажи, резервоари, инфилтрационно подхранване, евапорация и др.), в това число и

замърсявания от точкови, линейни и площни източници с различно по продължителност и интензивност действие.

## Заклучение

Предложеният общ методичен подход през последните две десетилетия доказва своята ефективност при научните и приложните изследвания в областта на управлението на водните ресурси и опазването на околната среда в Република България. Това се потвърждава не само от големия брой публикации по темата, но и при разрешаването на редица практически казуси, пряко свързани с изпълнението на националните законови и нормативни документи, както и на европейските директиви в тази сфера.

## Благодарности.

Настоящото изследване е проведено във връзка с изпълнението на Национална научна програма (ННП) „Опазване на околната среда и намаляване на риска от неблагоприятни явления и природни бедствия“, одобрена с Решение на МС № 577/17.08.2018 г. и финансирана от МОН (Споразумение № Д01-27/06.02.2024).

## Литература

Стоянов, Н. (2015). Математически моделни изследвания за оценка на защитния ефект от глинестия изолационен екран и задържащата способност на геоложката основа на депа за битови отпадъци, *Год. на МГУ, т.58 – 58-ма Международна научна сесия*, 20.10.2015, София, България (стр. 184-189). ISSN 1312 1820.

Стоянов, Н. (2019). *Математическо моделиране в хидрогеологията*. ИК “В. Недков”, София, 246 стр. ISBN 978-619-194-045-5.

Anderson, M., Woessner, W., Hunt, R. (2015). *Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport* (2nd ed.). Elsevier, Academic press, 720 p. ISBN: 978-0-12-058103-0.

Antonov, D., Kotsev, Ts., Benderev, A., Van Meir, N., Gerginov, P., Stoyanova, V., Tcherkezova, E. (2019). Estimating the moisture regime in variably saturated arsenic contaminated alluvial sediments by using HYDRUS-1D with daily meteorological data. *European Journal of Geography*, 10 (2), 42-55.

Antonov, D., Tsvetkova, M., Karastanev, D. (2020). Preliminary modelling of radionuclide migration in the argillaceous sediments of the Sumer Formation (Northwestern Bulgaria). *Geologica Balcanica*, 49 (3), 13-18. <https://doi.org/10.52321/GeolBalc.49.3.13>

Dahan, O. (2020). Vadose Zone Monitoring as a Key to Groundwater Protection. *Frontiers in Water*, 2, Article 599569. <https://doi.org/10.3389/frwa.2020.599569>

Gerginov, P., Antonov, D., Benderev, A., Stoyanova, V., Kotsev, T. (2020). Analysis and prognosis of the aqueous migration of arsenic based on complex study of Ogosta River valley`s hydrogeological elements. *Comptes rendus de l'Académie bulgare des Sciences*, 73 (10), 1409-1415. <https://doi.org/10.7546/CRABS.2020.10.10>

Harbaugh, A. (2005). Modflow-2005, The USGS modular ground-water model - the ground-water flow process: *U.S. Geological Survey Techniques And Methods 6-A16*, 253 p. <https://doi.org/10.3133/tm6A16>.

Healy, R. (1990). Simulation of solute transport in variably saturated porous media with supplemental information on modifications to the U.S. Geological Survey's Computer Program VS2D: *U.S. Geological Survey Water-Res. Investig. Report 90-4025*, 125 p., <https://doi.org/10.3133/wri904025>

Healy, R., & Ronan, A. (1996). Documentation of computer program VS2DH for simulation of energy transport in variably saturated porous media -- modification of the U.S. Geological Survey's computer program VS2DT: *U.S. Geological Survey Water-Res. Investig. Report 96-4230*, 36 p., <https://doi.org/10.3133/wri964230>

Healy, R. & Essaid, H. (2012). VS2DI: model use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE* 55 (4), 1249-1260. <https://doi.org/10.13031/2013.42238>

Hsieh, P., Wingle, W., & Healy, R. (2000). VS2DI - A graphical software package for simulating fluid flow and solute or energy transport in variably saturated porous media: *U.S. Geological Survey Water-Res. Investig. Report 99-4130*, 16 p., <https://doi.org/10.3133/wri994130>

Lappala, E., Healy, R., & Weeks, E. (1987). Documentation of computer program VS2D to solve the equations of fluid flow in variably saturated porous media: *U.S. Geological Survey Water-Res. Investig. Report 83-4099*, 184 p., <https://doi.org/10.3133/wri834099>

Oostrom, M., Truex, M.J., Last, G.V., Strickland, C.E., Tartakovsky, G.D. (2016). Evaluation of deep vadose zone contaminant flux into groundwater: Approach and case study. *Journal of Contaminant Hydrology*, 189, 27-43. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2016.03.002>

Šimůnek, J., van Genuchten, M.Th., Šejna, M. (2016). Recent Developments and Applications of the HYDRUS Computer Software Packages. *Vadose Zone Journal*, 15 (7), 1-25. <https://doi.org/10.2136/vzj2016.04.0033>

Zheng C., Wang, P. (1999). *MT3DMS: A modular three-dimensional multispecies transport model for simulation of advection, dispersion, and chemical reactions of contaminants in groundwater systems; documentation and user's guide*. – Contract Rep. SERDP-99-1, Department of geol. sciences, Univ. of Alabama, 221 p., 1999. <http://hdl.handle.net/11681/4734>

Zheng C., Bennet, G. (2002). *Applied contaminant transport modeling* (2nd ed.). J&WS, NY, 621 p., 2002 (2 Ed.). ISBN: 0-471-38477-1

# APPLICATIONS AND ADVANTAGES OF GEOPHYSICAL METHODS IN UNDERGROUND MINING

*Maya Tomova, Atanas Kisyov*

*University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: maya.grigorova@mgu.bg*

**ABSTRACT.** Geophysical methods play a crucial role in underground mining operations by providing valuable information about the subsurface geology, structural features, and potential hazards. Geophysical methods can provide valuable information in areas where direct access is limited or impossible, such as beneath thick layers of overburden, or in areas with difficult topography. Geophysical techniques, such as Electrical Resistivity Tomography (ERT), are widely used to map geological structures like faults, fractures, and bedding planes. This information helps in understanding the rock mass characteristics and potential zones of instability. Geophysical data can be integrated with geological, geochemical, and geotechnical data to develop comprehensive models of the subsurface. This integrated approach enhances the understanding of geological structures, ore body geometry, and rock mass behaviour, facilitating more informed decision-making in mine planning and development. Overall, the capabilities of geophysical methods in an underground mine encompass a wide range of applications, from geological mapping and resource exploration to hazard detection and ground stability monitoring, ultimately contributing to safer and more efficient mining operations.

**Key words:** electrical resistivity tomography, underground mine, geophysics.

## ПРИЛОЖЕНИЯ И ПРЕДИМСТВА НА ГЕОФИЗИЧНИТЕ МЕТОДИ В ПОДЗЕМНИ МИННИ ДЕЙНОСТИ

*Мая Томова, Атанас Кисъев*

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

**РЕЗЮМЕ.** Геофизичните методи имат важна роля в подземните минни операции, като предоставят ценна информация за подземните геоложки условия, структурните характеристики на терена и потенциалните рискове. Геофизичните методи могат да осигурят ценна информация в райони, където директният достъп е затруднен или невъзможен, като например под дебели слоеве откритка или в райони със затруднен достъп. Геофизични методи като електротомографията широко се прилагат за картографиране на геоложки структури като разломи, фрактури и фундамента. Тази информация подпомага разбирането за характеристиките на скалите и потенциалните зони на нестабилност в рудниците. Геофизичните данни могат да бъдат интегрирани с геоложки, геохимични и геотехнически данни, така че да бъде създаден достоверен модел на подповърхностното пространство. По такъв начин се подобрява разбирането за геоложките структури, геометрията на рудното тяло и поведението на скалната маса, което от своя страна води до по-информирано вземане на решения при планирането и развитието на мините. Като цяло, възможностите на геофизичните методи в подземните рудници обхващат широк спектър от приложения, от геолошко картографиране и проучване на ресурси до откриване на вероятни рискове и мониторинг на стабилността на земята, като в крайна сметка допринасят за по-безопасни и по-ефективни минни операции.

**Ключови думи:** електротомография, подземен рудник, геофизика.

## Introduction

Geophysical methods are commonly used for rapid data acquisition, allowing for efficient coverage of extensive areas in a cost-effective manner and have demonstrated their capability in mining projects of various scales.

A lot of case studies worldwide demonstrate the efficacy of geophysical methods in detecting underground openings. The current research is focused on localising man-made voids and cavities in underground mining conditions (Aleksandrova, et al., 2019). As Orfanos mention, cavities, voids, abandoned mine workings, and any kind of underground opening can be hazardous in geotechnical and environmental applications (Orfanos and Apostolopoulos, 2012).

The collapse of material overlying abandoned underground mine voids can indeed be a significant issue, particularly when it is coupled with fluctuations in water levels within these voids.

According to several researchers, cavities created by underground coal mining can be partially or fully filled with air, water, or sediment (Rodríguez, 2019; Van Schoor, 2002; Zhou et al., 2002). In areas with a history of mining activities, abandoned mine workings or old mine shafts can pose risks to current mining operations. Electrical resistivity tomography (ERT) can assist in detecting these subsurface features by identifying anomalies in electrical resistivity that are associated with man-made voids or infrastructure. Recognising and mapping these features is crucial for ensuring the safety of underground mining operations and preventing accidents.

In all cases, these cavities can be identified by the contrast between their physical properties and the surrounding geological environment. Electrical resistivity is one of the primary physical properties that makes it possible to characterise these structures (Militzer et al., 1979; Putiska et al., 2012).

Mining operations in Bulgaria have been traditional since ancient times. At the modern stage, mining is a fast-growing industry with great added value. Its development is mostly due to the constant search and implementation of innovations and modern technologies both in production and in research activities, safety and care for the environment. These activities collectively aim to make mining operations more efficient, safer, and environmentally sustainable. Mining industry continues to evolve with the advent of new technologies since sustainability and responsible mining practices become increasingly important. As Bharti stated, the assessment of underground mine environment by geophysical survey is considered a challenging task (Bharti, et al., 2022). Considering this, the application of non-invasive survey techniques to collect additional information on mining conditions contributes both to increasing the degree of confidence in the available data and to enriching the knowledge of the terrain with specific information (Alexandrova, et al., 2019). One of the appropriate tools for this purpose is geophysical methods, and more specifically electrotomography. This method is widely used in the mining industry, proving its effectiveness in underground mining as well.



In the context of underground mining conditions, electrotomography can be used to:

- Map the structure of the rock and locate potential areas of cracking or faults.
- Optimise the planning of mining operations and extraction processes by effectively delineating the boundaries of the mineralised zone and waste.
- Provide information about subsurface conditions, including the presence of cracks, faults, and changes in rock types. This data can be useful for geotechnical evaluations supporting the design and stability analysis of underground structures.
- Monitor changes in subsurface conditions over time, such as water table fluctuations, movement of fluids (including mining-induced water), and changes in rock properties that may affect stability.

Electrical resistivity tomography can assist in optimising the layout of mining operations by delineating mineralised zones, waste zones, and providing information on the distribution of ore bodies.

It can also be useful in environmental monitoring purposes, such as assessing the impact of mining activities on groundwater quality and flow paths.

## Description of the technology

Electrical resistivity tomography (ERT) is a valuable tool for detecting tunnels and underground openings, providing valuable information for engineering, construction, and geological investigations. Detecting cavities, tunnels or abandoned mine workings using resistivity tomography involves employing electrical resistivity imaging techniques to map subsurface structures based on variations in electrical conductivity. Resistivity tomography relies on the fact that different materials have different electrical resistivity values. According to Loke, electrical resistivity depends on geological material properties such as mineral composition, fluid content, porosity, salinity, temperature, and water saturation level (Loke 2004). By injecting electrical current into the ground through electrodes and measuring the resulting voltage, variations in resistivity can be detected, indicating the presence of subsurface features like tunnels or voids. When mining operations extract minerals from underground deposits, they create voids or empty spaces underground. If these voids are not properly backfilled or supported after mining operations cease, they can pose a risk of collapsing.

The material overlying these abandoned voids may become unstable over time due to factors, such as erosion, weathering, or changes in load distribution. This instability increases the likelihood of collapse.

Water infiltration into these abandoned voids can exacerbate the instability of the overlying material. Fluctuations in water levels, such as seasonal variations or changes in groundwater flow patterns, can exert pressure on the surrounding rock and soil, leading to erosion and weakening of support structures.

Within the mine workings themselves, fluctuations in water levels can also create instability. Water pressure can affect the integrity of support structures, such as pillars, beams, or walls, increasing the risk of collapse within the mine workings.

The geophysical survey is designed to meet some specific demands. To mitigate the risks associated with collapsed mine voids, various measures can be employed, including Electrical Resistivity Tomography (ERT) to identify voids, monitoring of water levels, stabilisation techniques like grouting or backfilling.

For the detection of subsurface voids, the electrical direct current methods have proved to be useful from a theoretical perspective (Spiegel et al., 1980; Sheets and Munk, 1997).

As Erkan stated, in the electrical direct current methods, the current electrodes (A and B) and voltage electrodes (M and N) can be arranged in several different geometries. For different array geometries, the geometric factor (k) changes according to the type of array. These variations offer many different practical applications of the electrical direct current methods depending on the type of target being investigated (Erkan, 2008).

The reliability of the geophysical images greatly depends on the correct and optimised application of measurements. The process of data recording is described by Sheets (2002). Data were gathered using automated resistivity measurements, enabling the placement of multiple electrodes at equal intervals along a survey line. Each electrode is linked to a computer-controlled device that sequences electrical pulses through various combinations of electrode configurations. The software records the applied current, resulting voltage potentials, and electrode geometry. Typically, the farther apart the electrodes are, the deeper the current penetrates (Sheets, 2002).

This geophysical technique is highly sensitive to various factors, and their consideration is crucial for its successful application. Electrical interference from nearby power lines, electromagnetic noise, and cultural noise (e.g., nearby machinery) can affect the quality of resistivity data, as well as correct application of the measurements.

## Field measurements and results

The measurements are performed in underground mining conditions. Field measurements are shown in Figure 1. As mentioned by Azadi, in electrical resistivity imaging, according to the purpose and location of data collection, the electrodes are placed in specific arrays, and data collection is performed. The collected data (potential distribution or apparent resistivity) is then transformed into a distribution of actual electrical resistivity values using inverse modelling methods (Azadi & Ghanati, 2022).

Field measurements are performed with the Australian ZZ *Universal 96 Resistivity/IP Meter* (Figure 2).

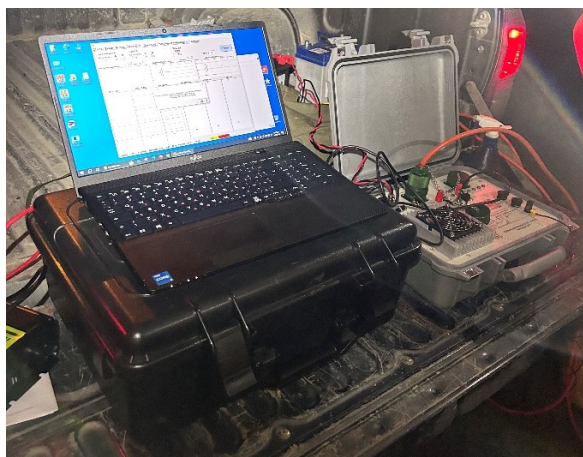


Fig. 2. ZZ Universal 96 Resistivity/IP Meter on the field

It is a leading geophysical instrument that provides accurate and reliable data on the electrical resistivity and induced polarisation (IP) of underground strata and objects. This innovative tool is designed to meet the increasing demands for accuracy and precision in mining, hydrogeology, construction, infrastructure sites, etc.

One of the most important steps in the survey is to ensure that the electrodes have good contact with the ground to ensure accurate measurements. Otherwise, the results can be affected by poor contacts between the media and the electrodes, leading to misleading data. In the specific underground conditions, the appropriate choice of electrodes are non-polarisable electrodes. They are specialised electrodes designed to minimise polarisation effects during electrical measurements.

Polarization occurs when there is a build-up of charge at the interface between the electrode and the electrolyte (soil, water, etc.), which can distort the measurements. Non-polarisable electrodes are engineered to reduce or eliminate this effect, providing more accurate and stable readings.

On the field, data were collected using automated resistivity measurements, allowing multiple electrodes to be placed at equal intervals along a survey line (Figure 3). Each electrode is connected to a computer-controlled device that sequences electrical pulses through different combinations of electrode configurations.



Fig. 3. Field measurements

A huge advantage of the instrument is the ability to display data quality immediately after the data collection is finished (Figure 4).

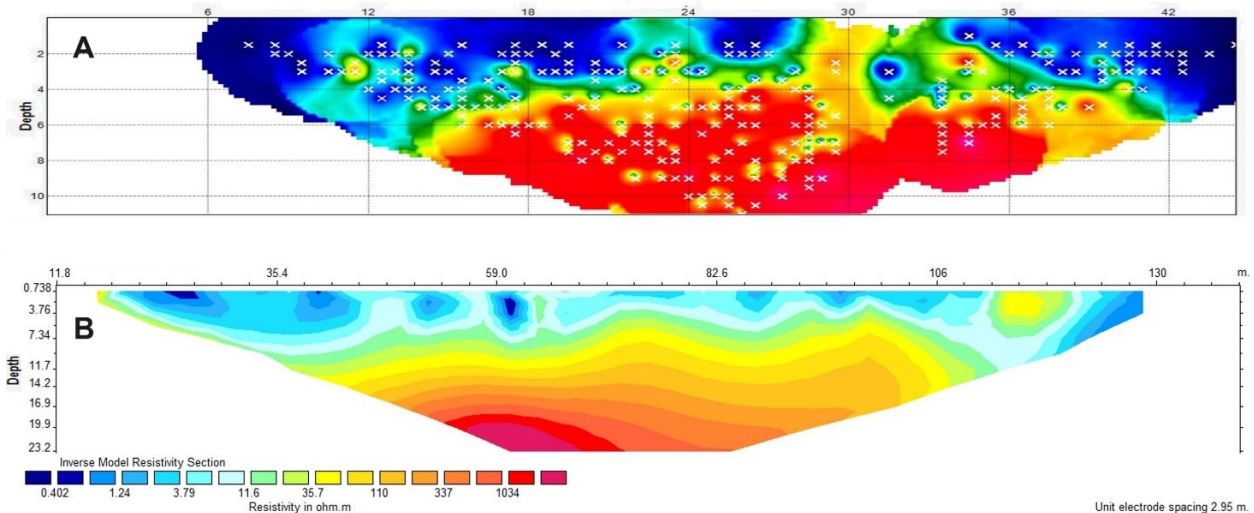


Fig. 4. Raw field data (A) and Pseudo-section representing the apparent resistivities of the subsurface (B)

The quality control on site enables the operator to review data directly in the field and respond promptly to eliminate any distortions, if possible.

The software records the applied current, resulting voltage potentials, and electrode geometry. Generally, the greater the distance between the electrodes, the deeper the current penetrates. One of the biggest disadvantages of the technology in underground conditions is that the space is limited and can not provide enough space between the electrodes. A very important step in field measurements is the choice of electrode configuration. The most used configurations are the Wenner array, Schlumberger, Dipole-Dipole, etc. The various options

depend on the desired depth of investigation and the expected subsurface conditions.

In this case study, the Wenner array configuration was chosen to perform the survey. It consists of four equally spaced electrodes that are placed in a straight line. It is a symmetric array, meaning that the distance between adjacent electrodes is the same. The electrical device includes 96 electrodes, spaced 3 meters apart. The collected data are then processed and inverted using the *RES2DINV* computer program (Loke, 2001). This computer program automatically determines the 2D resistivity model for the observed data (Griffiths, 1993). The results of the electrical method are presented as a pseudo-



section, representing the apparent resistivities of the subsurface as a function of depth in a vertical plane.

Data processing is a comprehensive and time-consuming process. It starts with detailed quality control including a review of the collected data for any anomalies or errors. The next step is inversion modelling, using the *RES2DINV* specialised software to process the resistivity data and create a resistivity model of the subsurface.

The interpretation process examines the resistivity profiles to identify anomalies and significant contrasts that may indicate voids, cavities, or other subsurface features.

Figure 5 shows a geoelectrical line located in an old mine shaft. The purpose of this measurement is to detect the presence of cavities behind the walls of the mine gallery. As seen in the interpreted section, electrotomography successfully detects the contrast boundary between the mine gallery, where the electrodes were placed, and the weak zone (Figure 5).

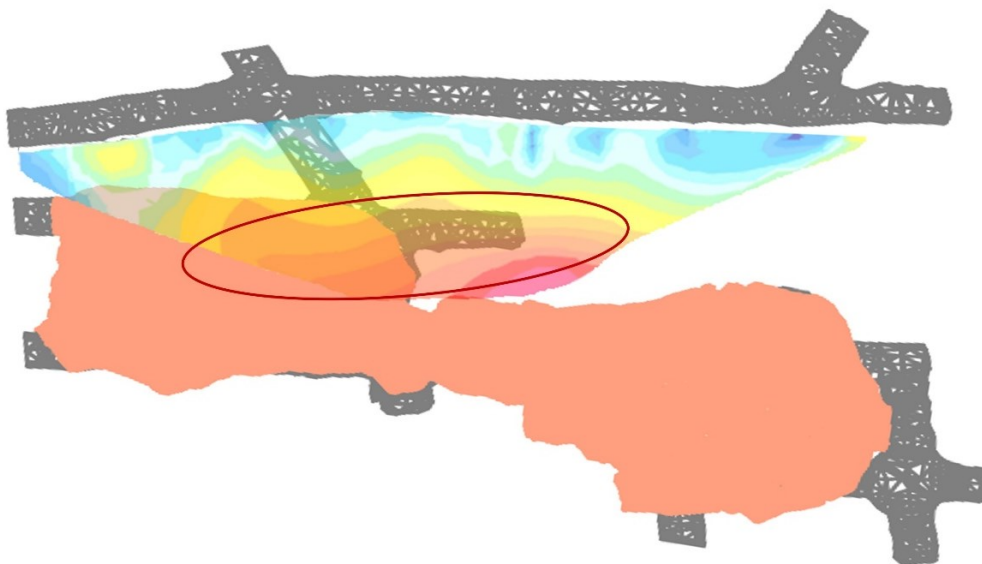


Figure 5. Geoelectrical line along the mine gallery

By analysing the resistivity data, anomalies that indicate the presence of cavities can be identified. High resistivity anomalies may indicate air-filled cavities, while low resistivity anomalies may indicate water-filled or sediment-filled cavities. Sediment-filled cavities may have resistivities that vary depending on the composition and saturation. In this case, the high resistivity response is considered as rock backfill and air.

## Conclusion

Water levels in abandoned underground mine voids can create instability not only in the support structures within the mine workings but also in the material overlying these voids, posing significant hazards to both underground and surface environments. It underscores the importance of proactive monitoring, maintenance, and risk mitigation strategies in managing the legacy of abandoned mines.

Based on the conducted research, the following more important conclusions can be drawn:

- Geophysical methods can be used to detect the location of possible cavities or disturbances in geological strata, through measurements carried out underground.

- The application of geophysical methods during the various stages of design, construction, and monitoring improves the overall understanding of the spatial structure and the stability of the tunnels, allowing informed and timely actions to be taken if necessary.

Electrical tomography is a versatile and valuable tool in underground mining operations, providing critical information for geological, geotechnical, and safety assessments. It aids in

optimising mining processes, improving safety, and ensuring environmental responsibility.

Geophysical methods prove a valuable tool for detecting cavities created by underground coal mining, especially when these cavities are filled with air, water, or sediment. It provides crucial information for geotechnical evaluations and ensures the safety and stability of mining operations.

## References

- Azadi, Yosra & Ghanati, Reza. (2022). *Influence of noise estimation on Electrical Resistivity Tomography Data Inversion*. 2538-371. 10.22059/jesphys.2022.342440.1007428.
- Aleksandrova, E., Asenovski, S., Georgiev, D., Kaykov, D., Koprev, I. (2019). Methods for determining an optimal technological solution for underwater mining. *Journal of Mining and Geological Sciences*, Vol. 62, pp. 5-8.
- Alexandrova, E., Dimitrov, J. (2019). Stereological analysis of the solid inclusions percentage in the clayey overburden. *Proceedings of the XV International conference of the open and underwater mining of minerals*, 03 – 07 June 2019, Varna, Bulgaria, 141-148.
- Batista Rodríguez, Jose & Flores, Marco & Almaguer Carmenates, Yuri & Hernández, Maximiliano & Rodríguez, J & Almaguer, Y & Hernández, Carmenates & Flores, M & Carmenates, Y & Hernández, M. (2019). Electrical Resistivity Tomography for the detection of subsurface cavities and related hazards caused by underground coal mining in Coahuila. *Geofísica Internacional*. 58. 279-293. 10.22201/igeof.00167169p.2019.58.4.2058.

- Bharti, Abhay & Prakash, Amar & Verma, Aniket & Oraon, J & Chaudhary, Dipesh & Kumar, S & Singh, K. (2022). Mapping of decades-old underground coal mine workings using electrical resistivity tomography. *Journal of Earth System Science*. 131. 258. 10.1007/s12040-022-02008-7.
- Erkan, K. (2008). A comparative overview of geophysical methods, The Ohio State University Columbus, Report No. 488, 2008. oai:kb.osu.edu:1811/78633 (last visited 27.02.2024)
- Griffiths D. H. and Barker, R. D. (1993) Two-Dimensional Resistivity Imaging and Modeling in Areas of Complex Geology. *Journal of Applied Geophysics*, 29, 21-26. [http://dx.doi.org/10.1016/0926-9851\(93\)90005-J](http://dx.doi.org/10.1016/0926-9851(93)90005-J)
- Loke, M. H. (1999). Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies a practical guide to 2-D and 3-D surveys 63.
- Militzer, H., Rösler, R., Lösch, W., (1979), Theoretical and experimental investigations for cavity research with geoelectrical resistivity methods. *Geophysical Prospecting*, 27, 640–652.
- Orfanos, Ch., George Apostolopoulos, G., (2012). Analysis of different geophysical methods in the detection of an underground opening at a controlled test site. *Journal of the Balkan geophysical society*, 15 (1), 7-18.
- Putiska, R., Nikolaj, M., Dostal, I., Kusnirak, D., (2012), Determination of cavities using electrical resistivity tomography. *Contributions to Geophysical and Geodesy*, 42, 201-211.
- Spiegel, R. J., Sturdivant, V. R., Owen, T. E. (1980). Modelling resistivity anomalies from localized voids under irregular terrain. *Geophysics* 1980; 45 (7), 1164–1183. doi: <https://doi.org/10.1190/1.1441115>
- Sheets, R., A., Munk, J., (1997), Detection of underground voids in Ohio by use of geophysical methods, *U.S. Geological Survey Water- Resources Investigations*, Report 97–4221.
- Sheets, Rodney. (2002) Use of Electrical Resistivity to Detect *Underground Mine Voids in Ohio*.
- Van Schoor, M. (2002). Detection of sinkholes using 2D electrical resistivity imaging. *Journal of Applied Geophysics*, 50, 393-399.
- Zhou, W., Beck, B. F., Adams, A.L., (2002), Effective electrode array in mapping karst hazards in electrical resistivity tomography. *Environ. Geol.*, 42, 922-928.

## KINEMATIC ANALYSIS FOR THE EVALUATION OF STRUCTURALLY CONTROLLED INSTABILITIES AT THE ELLATZITE OPEN PIT MINE

*Nikola Toshkov, Zhelyazko Yalamov, Georgi Royalski, Lyubomir Svilenov*

*Mining Complex, Ellatzite-Med AD, 2180 Etropole; E-mail: n.toshkov@ellatzite-med.com, zh.yalamov@ellatzite-med.com, g.royalski@ellatzite-med.com, l.svilenov@ellatzite-med.com*

**ABSTRACT.** While mining is considered a major triggering factor for slope instabilities in open pit mines, discontinuities within the rock mass, such as faults, joints, and anisotropy, like schistosity, often pre-define the failure mechanism. Kinematic analysis is applied to evaluate the possible failure mechanisms based on spatial and strength characteristics of the discontinuity sets for actual or design pit configuration. Bench-berm and inter-ramp analysis of wedge and plane failure mechanisms is performed in the Ellatzite open pit mine on a single bench and stack of benches. The obtained results are validated by observed back-breaks and failure angles at the mine.

**Key words:** kinematic analysis; KATS, back-break, failure angle, Ellatzite open pit.

### КИНЕМАТИЧЕН АНАЛИЗ ЗА ОЦЕНКА НА СТРУКТУРНО КОНТРОЛИРАНИ РАЗРУШЕНИЯ В РУДНИК „ЕЛАЦИТЕ“

*Никола Тошков, Желязко Ялъмов, Георги Роялски, Любомир Свиленов*

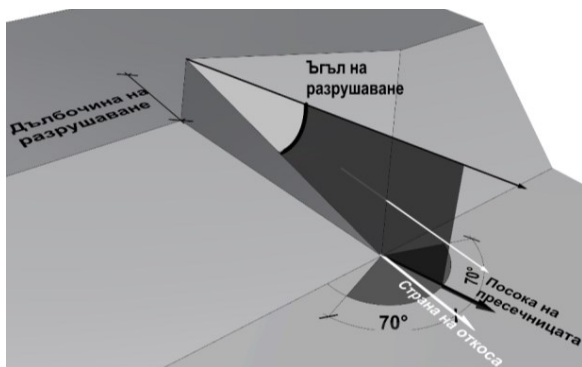
*Рудодобивен комплекс, Елаците-мед АД, 2180 Етрополе*

**РЕЗЮМЕ.** Докато минните дейности се считат за основна причина за предизвикването на разрушения на откосите в откритите рудници, прекъснатостите в скалния масив, като разломи, пукнатини и шистозност, често предопределят механизма на разрушаване. Кинематичният анализ оценява вероятността и големината на възможните структурни разрушавания за съществуваща и бъдеща минна конфигурация, чрез пространствените и якостни характеристики на прекъснатостите. В рудник „Елаците“ е извършен анализ на единично стъпало и пакет от стъпала за механизмите на плоско плъзгане и клиново разрушаване. Получените резултати за дълбочина на разрушаване на площадките и ъгълът на разрушаване са сравнени с наблюдаваните в рудника.

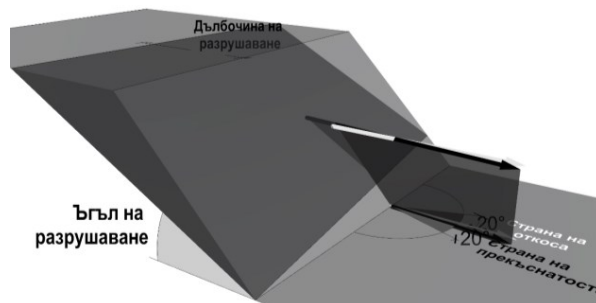
**Ключови думи:** кинематичен анализ; KATS, дълбочина на скъсване, ъгъл на разрушаване, рудник „Елаците“.

### Въведение

В почти всеки открит рудник е имало или има разрушавания от различен мащаб, от откъсване на отделен скален блок до разрушаване на цял скален откос на минната изработка. Причините могат да бъдат както поради разрушаване на скалния масив, който се съпротивлява със своята якост, така и поради структурна предопределеност, когато механизмът на разрушаване бъде прекатурване, плоско или клиново плъзгане (Фигури 1 и 2). В този случай минната конфигурация може да бъде определена чрез кинематичен анализ, в които се използват пространствените и якостни характеристики на групите прекъснатости и геометричните особености на скалния откос (Goodman, 1989; Wyllie & Mah, 2004).



**Фиг. 1** Дълбочина и ъгъл на разрушаване за клиново плъзгане. С бяла стрелка е показан векторът, описващ страната на откоса, а с тъмна – векторът, описващ посоката на пресечницата. Показан е ъгъл 70° в едната и другата страна от страната на откоса.



**Фиг. 2** Дълбочина и ъгъл на разрушаване за плоско плъзгане. С бяла стрелка е показан векторът, описващ страната на откоса, а с тъмна – векторът, описващ страната на прекъснатостта. Показан е ъгъл 20° в едната и другата страна от страната на откоса.

Този анализ може да бъде детерминистичен, разглеждащ единичен случай, или вероятностен, който разглежда множество случаи според вероятностното разпределение на входните параметри на прекъснатостите и на скалния откос. При извършване на вероятностния анализ, освен средният коефициент на устойчивост за определен механизъм на разрушаване, се изчисляват и геометричните характеристики на потенциалните разрушения за конкретна вероятност. Софтуерът KATS е инструмент за извършване на автоматизиран кинематичен анализ за откоси, с помощта на който може да се оцени обемът, дълбочината на скъсване, ъгълът на разрушаване и дължината на разливане за единично стъпало и пакет от стъпала (User's Manual KATS, 2018). Такъв анализ е приложен в рудник „Елаците“ за намиране на структурно предопределени механизми на разрушаване в отделни негови сектори и лито-тектонски домейни. Чрез



пространствен анализ на геодезично заснетите постигнати долни и горни ръбове на скалните откоси, са определени дълбочината на скъсване и ъгълът на разрушаване. Получените резултати от кинематичния и пространствен анализ са сравнени. Направени са препоръки за оразмеряване на откоса. В допълнение, чрез детерминистични анализи на конкретни разрушения на единично стъпало и пакет от стъпала са калибрирани якостните параметри на прекъснатостите.

### KATS и механизмите на плоско и клиново разрушаване

Докато за да възникне плоско плъзгане е нужно да има една прекъснатост или група от прекъснатости, то за клиново разрушаване са нужни минимум две такива, които да се пресичат в скалния масив. И за двата механизма, освен наличието на прекъснатости, е нужно да бъдат изпълнени допълнителни условия, за да възникне разрушение, като например плоскостта на плъзгане и пресечницата на двете прекъснатости да излизат на светлата част на откоса (Goodman, 1989). При плоското плъзгане наклонът на прекъснатостта трябва да бъде по-голям от силата на триене, която тя притежава, а страната към която затъва да не бъде с повече от 20° разлика от страната към която гледа скалният откос (Gómez & Silva, 2014). Възможността за изпълнение на тези условия са представени като независими вероятностни разпределения в KATS, а вероятността за възникване на плоско плъзгане се изчислява по Формула 1 (User’s Manual KATS, 2018).

$$P_{PF} = P_1 \times P_2 \times P_3 \times P_4 \quad (1)$$

където:

$P_{PF}$  – вероятност за възникване на плоско плъзгане;

$P_1$  – вероятност за възникване на прекъснатостите;

$P_2$  – вероятността ъгълът между страната на откоса и прекъснатостта да е по-малък или равен на 20°;

$P_3$  – вероятността прекъснатостта да излезе на светлото сечение на откоса;

$P_4$  – вероятността ъгълът на вътрешно триене да бъде по-нисък от наклона на прекъснатостта, ако отсъства кохезия.

При клиновото плъзгане, освен споменатите условия, е нужно ъгълът между вектора, описващ пресечницата на двете прекъснатости и вектора, описващ страната към която гледа откос, да бъде по-малък от 70°. С помощта на генератор за случайни числа – „Latin Hyper Cube“, се генерират 10 000 случая от комбинацията на статистическите вероятностни нормални разпределения на геометричните характеристики на откоса и прекъснатостите. След което, всеки генериран случай се валидира кинематично според посочените по-горе условия и са изчислени следните 3 вероятности:

$$F_o = \frac{\text{Брой кинематично валидни случаи}}{\text{Брой на генерираните случаи (10 000)}} \quad (2)$$

$$P_s = \frac{\text{Брой на неустойчивите клинове}}{\text{Брой кинематично валидни случаи}} \quad (3)$$

$$PF = F_o / P_s \quad (4)$$

където:

$F_o$  – кинематична вероятност за възникване;

$P_s$  – вероятност за загуба на устойчивост;

$PF$  – вероятност за клиново разрушаване.

За всеки от определените кинематично валидни случая е изчислен коефициентът на устойчивост по метода на граничното равновесие чрез двете класически формули (Goodman, 1989) съответно за клиново (Формула 5) и плоско плъзгане (Формула 6).

$$F_oS = (\sin \beta / \sin 1/2 \varepsilon) \times (\tan \varphi / \tan \psi_i) \quad (5)$$

$$F_oS = (\cos \psi_p \times \tan \varphi) / \sin \psi_p \quad (6)$$

където:

$\beta$  – ъгъл между посоката на откоса и пресечницата на двете плоскости при клиново плъзгане;

$\xi$  – половината от ъгъла, заключен между посоките на двете прекъснатости;

$\varphi$  – ъгъл на вътрешно триене по плоскостите;

$\psi_i$  – наклон на пресечницата за клиново плъзгане;

$\psi_p$  – наклон на прекъснатостта при плоско плъзгане.

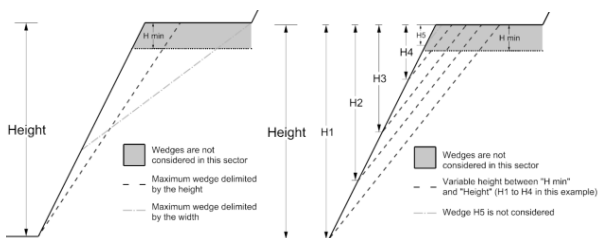
За да се провери конфигурацията на откоса, да се обобщят резултатите и да се изготвят препоръки за проектиране на борда срещу структурно контролирани разрушения, KATS се нуждае от определено ниво на допустимо разрушаване. В литературата са дадени различни препоръки, като в Read and Stacey, 2010, за единично стъпало, приемливото ниво на обезпеченост е вероятност от разрушаване под 25 % при коефициент на устойчивост 1.10, което с други думи означава, че стъпалото трябва да е толкова широко и откосът да е с такъв наклон, че в 75 % от случаите дълбочината на скъсване и радиусът на засипване да бъдат в рамките на стъпалото. За мащаба на пакет от стъпала, отделени чрез геотехническа берма, за откоси с висока важност за извършване на минните дейности, допустимо ниво е вероятността от разрушаване да е 10 % при коефициент на устойчивост 1.20. Резултатите от анализа са обобщени под формата на кумулативни вероятностни разпределения на елементите на разрушаване (обем, височина, дълбочина, ъгъл на разрушаване и дължина на разливане) с по-голяма вероятност и по-нисък коефициент от допустимите за отделните мащаби от конфигурацията на рудника.

### Анализ на клиново и плоско плъзгане в рудник „Елаците“

Кинематичният анализ в рудник „Елаците“ е извършен към фактическо положение на рудника от 2021 г. за два мащаба на конфигурацията – единично стъпало и пакет от стъпала. При анализа на единично стъпало са използвани пространствените и якостни характеристики на групите пукнатини, а за пакет от стъпала – групи пукнатини, големите пукнатини и разломи.

За разлика от останалите входни параметри, височината на разрушаване няма нормално вероятностно разпределение. Тя зависи от точното място на пресичане между прекъснатостта при плоското плъзгане или пресечницата при клиновото разрушаване и откоса. Това може да се случи във всяко едно място от височината на откоса. Софтуерът разполага с две възможности за генериране на височината на всеки един от изчислителните 10 000 случая – височината на разрушаване да бъде

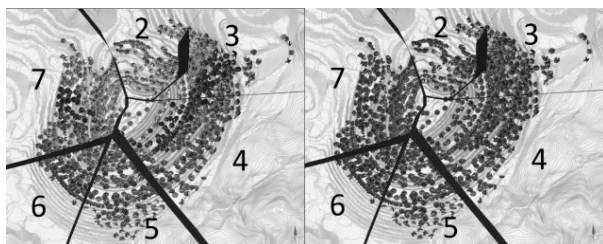
постоянна или варираща. При постоянна височина, генерираните разрушения са ограничени от максимална височина и ширина на единичното стъпало или пакета от стъпала. При варираща височина, вероятността плоскостта или пресечницата да пресекат откоса във всяка една точка от него е еднаква (Фиг. 3). И в двата случая могат да бъдат изключени много малки разрушения с височина, по-малка от приетата (User’s Manual KATS, 2018). В анализа направен в рудник „Елаците“ е използвана варираща височина на разрушаване и са изключени разрушения с височина по-малка от 3 m.



Фиг. 3 Генерирани разрушавания при фиксирана височина (вляво) и варираща – вдясно. И в двата случая могат да бъдат изключени разрушения с височина по-малка от минимално приетата (от User’s Manual KATS 2018).

### Структурни домейни, кинематични сектори и база данни на прекъснатостите

За целите на анализа, за всички структурни измервания, съдържащи се в базата от данни с прекъснатостите в скалния масив от различен ранг и тип (Yalamov & Hadzieva, 2020), бяха създадени атрибутивни полета за лито-тектонски домейн и сектор от рудника към геометричното му състояние от м. септември, 2021 г. Това позволи допълнителна гъвкавост при аранжирането на данните за извършения статистически и стереографски анализ (Фиг. 4).



Фиг. 4. Пространствена позиция на измерванията за групи пукнатини. Вляво – оцветяване по лито-тектонски домейн. Вдясно - оцветяване по геометричен сектор на рудника.

Таблица 1. Пространствени характеристики на откоса за единично стъпало и пакет от стъпала за структурен домейн от гранодиорити GRD\_101 в различните кинематични сектори, където той се разкрива.

Кинематичен сектор	Структурен домейн	Височина на стъпалото / пакета от стъпала, m	Ширина на стъпалото / пакета от стъпала, m	Ъгъл на стъпалото / междурампов ъгъл, °				Страна на откоса, °			
				Среден	Стандартно отклонение	Относителен минимум	Относителен максимум	Средна	Стандартно отклонение	Относителен минимум	Относителен максимум
2	GRD_101	30 / 120	12 / 20	65 / 49.1	1.5 / 1.5	62 / 46.1	68 / 52.1	218.5	53.0	192.0	245.0
3	GRD_101	30 / 120	12 / 20	65 / 49.1	1.5 / 1.5	62 / 46.1	68 / 52.1	242.0	34.0	225.0	259.0
7	GRD_101	30 / 120	12 / 20	65 / 49.1	1.5 / 1.5	62 / 46.1	68 / 52.1	111.5	7.0	108.0	115.0

### Определяне на пространствените и якостни характеристики на групите прекъснатости

Теренните структурни измервания с компас, разделени съответно на класове прекъснатости, кинематични сектори и структурни домейни са използвани в софтуера Dips за определяне на различните групи прекъснатости спрямо тяхната ориентация. В базата данни е създаден нов атрибут за съответната група и клас прекъснатост и са определени статистическото разпределение на техния наклон и посока. За всяка група пукнатини, големи пукнатини и разломи са определени относителните минимум и максимум (средната стойност съответно минус и плюс два пъти стандартното отклонение) на наклона и страната (Таблица 2).

Таблица 2. Пространствени характеристики на прекъснатостите от клас пукнатини за лито-тектонски домейн GRD\_101 след групирането им в пукнатини системи чрез анализ в Dips.

Кинематичен сектор	Структурен домейн	Пукнатинна група	Наклон, °				Страна, °			
			Средно	Стандартно отклонение	Относителен минимум	Относителен максимум	Средно	Стандартно отклонение	Относителен минимум	Относителен максимум
2	GRD_101	JS1	78.1	24.1	30.0	90.0	186.7	24.2	138.3	235.2
2	GRD_101	JS2	37.6	9.9	17.8	57.5	182.8	58.8	65.1	300.4
2	GRD_101	JS3	79.2	22.2	34.7	90.0	272.2	22.4	227.3	317.1
2	GRD_101	JS4	78.8	19.6	39.6	90.0	242.4	9.5	223.5	261.3
2	GRD_101	JS5	28.8	12.2	4.5	53.2	346.3	38.9	268.5	64.1

Определянето на якостните параметри на прекъснатостите от клас пукнатини, използвани при анализа на единично стъпало, е извършено чрез програмата RocData по метода на Barton and Choubey за всеки лито-тектонски домейн. Данните, необходими за определяне на кохезията и ъгъла на вътрешно триене, са посочени в Таблица 3.

Таблица 3. Якостни параметри на пукнатини определени по метода на Barton and Choubey. JRC0, JCS0, JRCn и JCSn са съответно грапавост на пукнатина с дължина 0.1 m, якост на едноосов натиск на пукнатина с дължина 0.1 m, грапавина и якост на едноосов натиск на пукнатината с дължина равна на блоковете в масива (10m) за съответния литоложки тип скала.

Скален тип	JRC0	JCS0, MPa	Базов ъгъл на вътрешно триене, °	JRCn	JCSn, MPa	Кохезия, kPa				Ъгъл на вътрешно триене, °			
						Средно	Стандартно отклонение	Относителен минимум	Относителен максимум	Средно	Стандартно отклонение	Относителен минимум	Относителен максимум
GRD	8.0	97.3	31.0	3.8	32.2	9.5	5.0	0.0	19.5	37.3	2.0	33.3	41.3
HFS	7.0	60.0	27.0	3.7	22.8	8.4	5.0	0.0	18.4	33.6	2.5	28.6	38.6
MDP	8.0	89.0	29.0	3.8	29.1	9.0	5.0	0.0	19.0	35.1	1.5	32.1	38.1
SCH	6.0	27.0	26.0	3.5	11.8	7.5	5.0	0.0	17.5	30.3	2.0	26.3	34.3
PHY	6.0	17.0	26.0	3.5	7.4	7.2	5.0	0.0	17.2	29.6	2.0	25.6	33.6

За анализа на пакет от стъпала са използвани и прекъснатостите от клас големи пукнатини и разломи. Лабораторни изпитвания на тектонска глина са използвани за якостните параметри на разломите. Средният ъгъл на вътрешно триене е 23°, а кохезията – 32 kPa. При определянето на якостните параметри на групите пукнатини и големите пукнатини за мащаба на пакет от стъпала е използван методът на Jennings 1970, при който якостта на системата прекъснатости зависи от дължината ѝ и тази на скалния мост (Формули 7 и 8). Скалният мост има якост на

не нарушения масив, докато развитата прекъснатост – тази на пукнатините системи (Таблица 4).

$$c_{eq} = (1 - k) \times c + k \times c_i \quad (7)$$

$$\tan\varphi_{eq} = (1 - k) \times \tan\varphi + k \times \tan\varphi_i \quad (8)$$

където:

$k$  – коефициент на продължителност –  $k = \Sigma l_j / (\Sigma l_j + \Sigma l_r)$

$c, c_j$  и  $c_{eq}$  – кохезия на скалния масив, пукнатините и системата прекъснатости;

$\varphi, \varphi_j$  и  $\varphi_{eq}$  – ъгъл на вътрешно триене на скалния масив, пукнатините и системата прекъснатости;

$l_r$  и  $l_j$  – дължина на скалния мост и прекъснатостта.

Таблица 4. Якостни параметри на групи от пукнатини и големи пукнатини за мащаба на пакет от стъпала.

GRD – гранодиорити; HFS- хорнфелзи; МДП – монцодиоритови порфирити; SCH- шисти; PHU – филити.

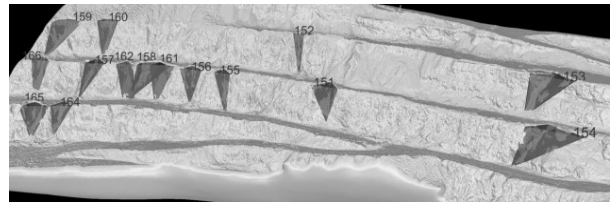
Скален тип	Якост на пукнатини		Якост на скалния масив		Ъгъл на вътрешно триене на J/MJ и скалния мост	Съотношение между дължината на J/MJ и скалния мост	Коефициент на продължителност (J/MJ)	Еквивалентна кохезия за J/MJ, КРА				Еквивалентен ъгъл на вътрешно триене J/MJ, °			
	Кохезия, КРА	Ъгъл на вътрешно триене, °	Кохезия, КРА	Ъгъл на вътрешно триене, °				Средна	Стандартно отклонение	Относителен минимум	Относителен максимум	Средна	Стандартно отклонение	Относителен минимум	Относителен максимум
GRD	9.5	37.3	527.6	59.4	1:1/3:1	0.5/0.75	269/139	67/35	134/70	403/209	48/43	5/4	39/34	58/51	
HFS	8.4	33.6	344.2	51.7	1:1/3:1	0.5/0.75	176/92	44/23	88/46	264/139	43/38	4/4	34/30	51/46	
MDP	9.0	35.1	468.7	55.9	2:1/3:1	0.75/0.75	124/124	31/31	62/62	186/186	40/40	4/4	32/32	48/48	
SCH	7.5	30.3	95.4	39.2	1:1/3:1	0.67/0.75	37/29	9/7	18/15	55/44	33/32	3/3	27/26	40/39	
PHU	7.2	29.6	58.4	30.3	1:1/3:1	0.75/0.75	20/20	5/5	10/10	30/30	30/30	3/3	24/24	36/36	

### Калибриране на якостните параметри по разрушения на единично стъпало

За калибриране на якостните параметри на пукнатините в монцодиоритовите порфирити (MDP 123) в сектори 6 и 7 е използван ортофото модел, чрез който са извадени характеристиките на 14 клинови разрушения, на които детерминистично е изчислен коефициент на устойчивост в KATS, (Фиг. 5). Освен със средните якостни параметри, направени са и допълнителни изчисления с относителния минимум и максимум. Резултатите са посочени в Таблица 5, от която става ясно, че само един клин има устойчивост над 1.0 със средни и относително минимални якостни параметри, а с относителния максимум – 50 % от клиновете са с коефициент над 1.0.

Таблица 5. Резултат от детерминистичен анализ за калибриране на якостните параметри на пукнатините системи за кинематичен сектор 7 и структурен (литотектонски) domeйн MDP\_123

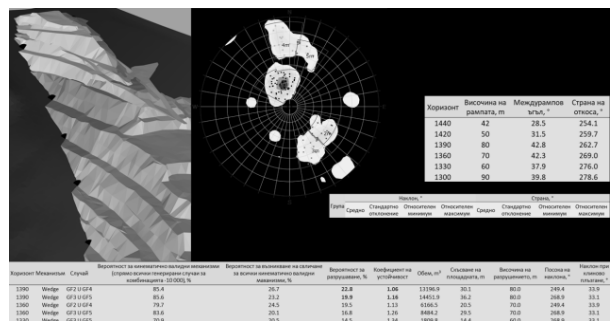
Спиралното разрушение	Площност	Наклон, °	Срана, °	Режим на разрушаването	Обем, m³	Скъбян на площадката, m	Височина на разрушаването, m	Характеристики на пресечницата		Коефициент на устойчивост		
								Наклон, °	Посока, °	Относителен минимум	Среден	Относителен максимум
151	1	60.3	153.2	По пресечницата	1457.6	12.0	26.8	93.0	41.3	0.83	0.89	1.03
	2	68.4	44.1									
152	1	69.3	144.7	По пресечницата	292.8	6.3	30.0	82.0	50.2	0.83	0.89	1.03
	2	60.4	34.9									
153	1	43.8	136.4	По пресечницата	2424.3	13.9	30.0	121.7	42.9	0.80	0.87	1.00
	2	69.5	51.6									
154	1	41.1	131.3	По плоскост 1	2624.7	12.5	27.8	146.9	40.0	0.77	0.83	0.96
	2	73.8	71.5									
155	1	69.3	142.7	По пресечницата	585.3	8.2	30.0	77.5	47.7	0.80	0.86	0.99
	2	52.8	44.1									
156	1	58.2	135.1	По пресечницата	1113.5	9.7	30.0	86.2	46.7	0.74	0.80	0.93
	2	51.4	54.2									
157	1	48.0	140.2	По пресечницата	1146.7	12.7	30.0	114.8	45.1	0.90	0.96	1.11
	2	83.8	31.1									
158	1	43.4	118.0	По пресечницата	2308.9	13.9	30.0	116.3	43.4	0.72	0.78	0.90
	2	85.1	31.3									
159	1	39.8	150.9	По пресечницата	1357.7	11.1	30.0	129.1	38.9	1.04	1.10	1.26
	2	72.4	54.0									
160	1	58.4	138.7	По пресечницата	800.2	9.3	30.0	96.2	50.0	0.74	0.80	0.92
	2	63.4	43.2									
161	1	57.4	153.3	По пресечницата	1351.8	13.2	30.0	105.7	46.7	0.90	0.96	1.11
	2	64.6	45.9									
164	1	47.5	129.3	По пресечницата	1440.7	11.9	30.0	97.5	42.9	0.87	0.93	1.07
	2	60.0	39.9									
165	1	50.0	112.0	По пресечницата	1245.3	8.9	28.0	82.2	45.9	0.71	0.77	0.88
	2	50.7	50.4									
166	1	60.9	141.8	По пресечницата	514.5	8.1	30.0	97.9	52.3	0.74	0.80	0.92
	2	68.8	37.7									



Фиг. 5. Ортофото модел на клинове в сектор 7 на рудника. Пространствените характеристики на прекъснатостите изграждащи всеки клин са измерени и използвани при изчисление на коефициента на устойчивост. Номерацията на всеки клин е както в Таблица 5.

### Калибриране на якостните параметри по разрушение на пакет от стъпала

Якостните параметри по метода на Jennings за групите пукнатини и големи пукнатини са използвани при анализ на структурно контролирано разрушение на пакет от стъпала. Разрушението възниква над разлом „Полегат североизток“, когато минните дейности достигат долния ръб на стъпало с кота 1390. Поради това, анализът е направен с данни за прекъснатости в domeйн SCH 201, който се намира над разлома, а геометрията на откоса е измерена към всяка точка на пресичане на разлома с долния ръб на хоризонтите от 1300 до 1440 (Фиг. 6). Анализът показва, че при изкопането на хоризонти 1440 и 1420 няма вероятност от разрушаване, но вероятността от клиново разрушаване на хоризонт 1390 е най-висока (22.8 %), а коефициентът на устойчивост е 1.06. Коефициентът на устойчивост е по-висок от граничния, тъй като използваните якостни параметри за скалния мост са за не изветряла скала, докато скалите и прекъснатостите на хоризонт 1420 са засегнати от изветрителни процеси поради близостта си до естествения терен.



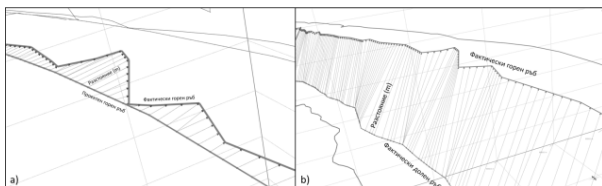
Фиг. 6. Конфигурация на откоса над разлом „Полегат североизток“. Определените системи от прекъснатости за анализа са показани на стереографска проекция в средата, а входните данни за ориентацията на откоса към всеки хоризонт, както и на групите прекъснатости са посочени вдясно. В таблицата най-долу са посочени резултатите и коефициентът на устойчивост към всеки хоризонт.

### Количествена оценка на дълбочина на разрушаване на бермата (backbreak) и ъгъл на разрушаване на единичен откос (failure angle) към фактическа конфигурация на рудника.

За прилагане и валидиране на кинематичния анализ беше извършена количествена оценка за разрушената част

от проектните берми и постигнатите ъгли на единични откоси. Оценката се базира на пространствен анализ на проектни горни ръбове на откосите и маркшайдерски заснети фактически горни и долни ръбове на откосите. На тримерните геометрични линии, описващи ръбовете е извършено погъстяване (генериране) на възли през 2.0 m, със запазване на съществуващите характерни точки от тях. Процедурите по погъстяване на точките, измерване на разстоянията, запазването им като атрибутивни стойности и трансферът на атрибутивни данни между отделните пространствени заявки са извършени в среда на софтуера MOVE.

Оценката за **дълбочината на разрушаване на площадките (backbreak)** е извършена чрез пространствена заявка за селекция на най-близките възли от фактическия горен ръб по отношение на възлите от проектния горен ръб (Фиг.7а). Измерените разстояния между възлите са съхранени като стойности в новосъздаден атрибут на линията с фактически горен ръб.



Фиг. 7. Пространствен анализ на фактически и проектни ръбове на рудника: а). оценка на разрушение в бермата между проект и постигнат горен ръб; б). Измерване на разстояние между възлите на постигнат долен и горен ръб на рудника за определяне на ъгъла на единичен откос.

За оценката на **фактическите ъгли на единични откоси** са анализирани линиите за фактически долен и горен ръб на откоса. Във възлите на анализирания долен ръб е създаден атрибут „Z\_toe“, съдържащ котата на съответната точка. След това е извършена пространствена заявка за селекция на най-близките възли от фактическия горен ръб по отношение на анализирания долен ръб (Фиг. 7b). Разстоянията между отделните възли на двете линии са съхранени като нов атрибут за разстояние във възлите на линията за горен ръб. Освен измерените разстояния, при пространствената селекция е направен и трансфер (миграция) на атрибута „Z\_toe“, от линията за долен ръб в линията за фактически горен ръб. Фактическите ъгли на единичен откос са изчислени в атрибутивния калкулатор на софтуера по Формула 9.

$$Slope\_angle = deg \left( \arcsin \left( \frac{Z - Z_{toe}}{Nearest\_vertex\_distance} \right) \right) \quad (9)$$

където:

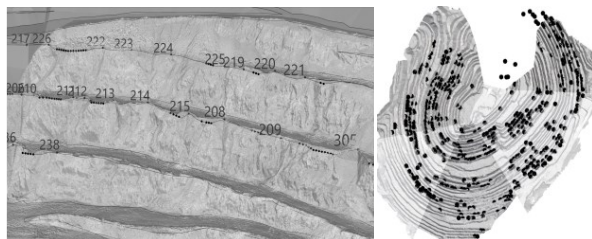
„Slope\_angle” – ъгъл на откоса;

„Z” – „Z\_toe” – височина на откоса;

„Nearest\_vertex\_distance” – тримерно разстояние между най-близките възли от двете линии.

Резултатът от извършения пространствен анализ са близо 24 000 точки в пространството за отработените хоризонти на рудника с атрибутивни данни за всяка от тях, включващи: дълбочина на разрушаване на площадките, постигнати ъгли на единични откоси, лито-тектонски домейн и сектор от рудника.

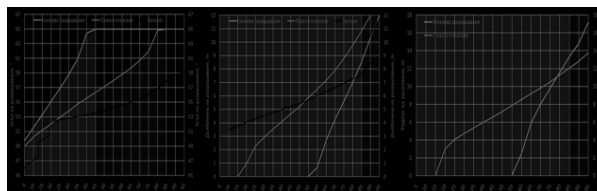
По информацията за дълбочина на разрушаване в точките от фактическия горен ръб, е извършен последователен анализ за намиране на тези с максимум или най-голяма дълбочина на разрушаване. Намерени са 479 броя разрушения, които са обединени в каталог и с тях са построени вероятностни разпределения, които са използвани за сравнение с тези изчислени от KATS (Фиг. 8). Изключена от анализа е информацията за точките на разстояние 5 m от точката, в която се достига максимум. Информацията в точките извън обхвата на разрушение е използвана за намиране на постигнатите ъгли, които не са засегнати от структурни разрушения.



Фиг. 8. Вляво е показан ортофото модел и заснетите горни и долни ръбове. Местата на структурните разрушения от каталога са обозначени с точка и поредния номер, а тези без разрушения с поредица от точки. В дясно са показани всички точки с установени структурни разрушения използвани в каталога.

## Обсъждане на резултатите между извършения кинематичен и пространствен анализ

Построени са вероятностни кумулативни криви за ъгъла и дълбочината на разрушаване и за дължината на засипване за тези кинематични сектори и структурни домейни, които не отговарят на критериите за безопасност. Върху кривите са наложените и получените от пространствения анализ данни. Пример за сектор 7 в структурен домейн MDP\_123 е показан на Фигура 9, от която се вижда, че за 85 % безопасност, структурният домейн трябва да има единични площадки с широчина не по-малки от 11 m, а ъгълът на откоса при плоско плъзгане при 65° има желаната безопасност, но при клиновото плъзгане тя е 45%. Пространствените данни от друга страна показват, че допустимата безопасност за широчината на площадката и ъгълът на откоса е изпълнена.



Фиг. 9. Њгъл и дълбочина на разрушаване и радиус на засипване за MDP 123 в сектор 7. С тъмна линия на първата и втора графика са илюстрирани данните от пространствения анализ на фактическо положение, а с другите две данните от KATS за клиново и плоско разрушаване, като по-светлата е за клиново. По хоризонталната ос е кумулативното разпределение в проценти.

## **Литература**

- Gómez, P., & Silva, R. (2014). A Kinematic Analysis Tool for Slopes (KATS). *Rock Mechanics for Natural Resources and Infrastructure SBMR 2014 – ISRM Specialized Conference*, 09–13.
- Goodman, R. E. (1989). *Introduction to Rock Mechanics* (2nd ed.). John Wiley & Sons Ltd.
- Jennings, J. E. (1970). A Mathematical Theory for the Calculation of the Stability of slopes in Open Cast mines. *Planning of Open Pit Mines*, 87–102.
- Read, J., & Stacey, P. (Eds.). (2010). *Guidelines for open pit slope design*. CSIRO Publ.
- User's Manual KATS. (2018). *User's Manual KATS*. Itasca Chile SpA.
- Wyllie, D. C., & Mah, C. W. (2004). *Rock Slope Engineering: Civil and Mining, 4th Edition*.
- Yalamov, Z., & Hadzieva, N. (2020). Adopted Approaches and Practices During the Structural-Geological Investigation of the Rock Mass in Ellatzite Open Pit Mine, for the Purpose of Numerical Modelin and Mine Design. *Proceedings of the IX International Geomechanical Conference 7-11 September 2020, Varna, Bulgaria*.



## A MESSERSCHMITT ME 109 G-6 FIGHTER: MAGNETOMETRIC STUDIES ON THE TRAIL OF AN UNEXPECTED WORLD WAR II FIND

Christian Tzankov

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: ch.tzankov@gmail.com

**ABSTRACT.** On May 8, when digging a drainage hole in an agricultural property near the village of Maritsa, Samokov municipality, Sofia region, parts of a combat plane were found, which, according to initial information, belonged to a Messerschmitt Me 109 G-6 fighter, shot down near the village during the Second World War. The uniqueness of the discovery and the need to excavate it for further investigations gave us the reason to use precise non-destructive methods in order to locate the position of the underground remains of the aircraft and its cargo. In this regard, detailed geomagnetic studies were carried out in the area in order to search and locate anomalous areas that could be related to the presence of the ammunition and remnants of the fighter jet scattered around during the collision with the earth's surface. Based on the processed and interpreted geomagnetic data, nine anomalous areas were identified, where the attention of the authorities and specialists responsible for excavating the discovery was directed.

**Key words:** magnetic gradiometry, UXO, WWII, Messerschmitt fighter

### ИЗТРЕБИТЕЛ МЕСЕРШМИТ МЕ 109 G-6: МАГНИТОМЕТРИЧНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ ПО СЛЕДИТЕ НА ЕДНА НЕОЧАКВАНА НАХОДКА ОТ ВТОРАТА СВЕТОВНА ВОЙНА

Християн Цанков

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

**РЕЗЮМЕ.** На 8-ми май, при разкопаване на дупка за отводняване в земеделски имот край с. Марица, общ. Самоков, Софийска област, са открити части от боен самолет, който според първоначалната информация е изстребител Месершмит Ме 109 G-6, свален край селото през Втората световна война. Уникалността на откритието и необходимостта от неговото разкопаване и изследване дадоха основание да бъдат приложени прецизни недеструктивни геофизични методи с цел локализиране на останките от летателния апарат и товара му. В тази връзка в района на обекта са проведени детайлни геомагнитни изследвания със задача търсене и локализиране аномални зони, които биха могли да бъдат свързани с наличието на разпръснатите се при сблъсъка със земната повърхност амуниции и останки от изстребителя. Въз основа на обработените и интерпретирани геомагнитни данни са набелязани девет аномални участъка, към които е насочено вниманието на военното ръководство, натоварено с отговорността за разкопаване и изваждане на находката.

**Ключови думи:** магнитна градиентометрия, невзривени амуниции, ВСВ, изстребител Месершмит

### Въведение

При изкопни дейности за отводняване на терен в землището на с. Марица, на 8-ми май 2018 г., местен тракторист случайно открива останки от самолет, който според спомени на възрастни хора от селото е бил свален през Втората световна война. За кратко време новината се разпространява в медиите, като първоначалната информация за находката е представена най-подробно в сайта на Информационния център към Министерството на отбраната (Жеков, 2018). Военният телевизионен канал също излъчва кратък, но съдържателен репортаж, в който се обобщава наличната към момента информация за самолета (Сапунджиева, 2018).

Очевидно става въпрос за изстребител „Messerschmitt Bf-109 G-6“, който през Втората световна война е била на въоръжение във Въздушните на Негово Величество войски. Тези летателни апарати представлявали едни от най-модерните за времето си бойни машини. Към момента на откриването на находката хипотезите за произхода ѝ са две. Според първата версия това е самолетът на подпоручик Иван Бонев, а според втората – откритият изстребител е на сваления подпоручик Тодор Резов.

След отправено към Минно-геоложкия университет „Св. Иван Рилски“ (МГУ) запитване от страна на Националния военноисторически музей (НВИМ) за спешно провеждане на безразрушително изследване на мястото на катастрофата, на 12-ти май 2018 г. районът бе посетен от геофизичен екип и проучен недеструктивно чрез магнитна градиентометрия.

Предвид желанието на НВИМ за бърза реакция и навремени резултати, още на следващия ден обектът бе посетен за втори път. Въз основа на първичните данни от геомагнитното проучване, с дървени табели върху терена бяха отбелязани местата с регистрирани аномалии в геомагнитното поле, които биха могли да бъдат причинени от части и конструктивни елементи на падналия изстребител. Това насочи и значително улесни предстоящите дейности по изваждането на останките с цел бъдещото им изследване и реставриране.



Фиг. 1. Обзорен GoogleEarth изглед от района на с. Марица с отбелязана локация на мястото на откритите останки от изстребител Месершмит Ме 109 G-6

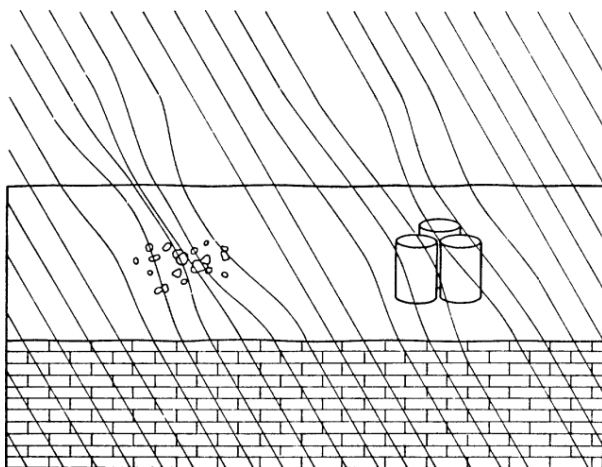
## Приложимост на плитката геофизика, респ. на магнитометрията

Плитката (приповърхностна) геофизика е основно направление в приложната геофизика. С обхват от няколко десетки сантиметра до няколко стотин метра, тя обединява геофизични методи и техники подходящи за решаване на разнообразни геоложки, хидрогеоложки, инженерно-геоложки, инженерно-технически, археоложки, еколожки и др. задачи (Тонков, 2013; Цанков, 2013; Кисьов, 2020).

Освен бързодействието, друго много важно предимство на геофизичните методи е, че те не нарушават целостта или повърхността на обекта, предмет на изследване. При това получаваната информация е за естествените условия на разположение на средата и изследваните обекти, като в зависимост от използваната методика се осигурява двумерно (2D) и/или тримерно (3D) изследване на геоложкия разрез.

Магнитните методи в геофизиката дават възможност за изучаване на геоложкия строеж на земната кора и литосферата въз основа на аномалиите на геомагнитното поле. Тези аномалии се дължат на различното съдържание или отсъствие на феромагнитни минерали в скалите, както и наличието на феромагнитни предмети (фиг. 2).

Интензитетът и/или елементите на геомагнитното поле се определят с магнитометри, като в зависимост от тяхната точност и допълнителни възможности те могат да бъдат използвани при решаването на редица задачи в най-различни сфери на познанието, включващи: структурна и рудна геология; изследване на околната среда; разнообразни инженерни задачи; локализиране на комуникации; откриване на зарити снаряди и боеприпаси; археоложки проучвания; измервания в магнитни обсерватории; мониторинг на вулкани и прогнозиране на земетресения; откриване на подводници и потънали кораби; медицина и др.



Фиг. 2. Локални смущения в магнитното поле предизвикани от подземни феромагнитни обекти: дребни фрагменти (ляво) и по-едри обекти (дясно) (съгл. Venson et al., 1984)

Тъй като при повечето от описаните по-горе случаи, обектите предмет на интерес се разполагат в близост до земната повърхност, регистрираните аномалии са издържани и добре изразени. Този ефект се усилва с увеличаване контраста между магнитните им свойства и заобикалящата ги среда. Често обаче, особено в градска

среда, данните могат да бъдат повлияни от наличието на изкуствен шум или различни феромагнитни отпадъци в приповърхностния слой. Тези пречещи ефекти могат да бъдат редуцирани значително чрез използване на вертикална градиентометрия, т.е. конфигурация от два магнитни сензора разположени вертикално. Градиентометрите премахват голяма част от нежелания „шум“ и са идеални за локализиране на контурите на заровени предмети. Също така, магнитните градиентометри не се влияят от денонощната вариация на магнитното поле, като по този начин се елиминира необходимостта от инсталиране на допълнителна базова станция.

Както беше отбелязано по-горе, градиентометърът има много по-голяма разделителна способност в близост до повърхността в сравнение с едносензорния магнитометър. Това прави този тип конфигурация идеален инструмент за локализиране на малки цели. За ефективно приложение на градиентометрията е необходимо конфигурацията да се състои от минимум една двойка сензори с висока чувствителност, стабилност и абсолютна точност. Монтирането на две или повече сензорни двойки през определено разстояние (12,5 cm, 25 cm, 50 cm или 100 cm) върху рамка за теглене или бутане осигурява по-висока скорост и детайлност на измерванията.

Ролята на магнитните проучвания в представеното изследване е да бъдат локализирани и набелязани места с аномално магнитно поле, отговарящи по форма и интензитет на търсения обект или части от него, включващи останки от двигателя на самолета, корпуса и евентуални боеприпаси.

## Използвана апаратура

За решаването на задачата са използвани два протонни магнитометъра. Първият уред, градиентометър модел GSM-19TGW, в окомплектовката на който влизат контролно устройство, два магнитни сензора, които се монтират на известно разстояние един над друг както и високоточен (< 1,2 m) диференциален GPS, е използван за регистриране на геомагнитните данни по трасетата на проучвателните профили, покриващи изследвания участък. Вторият магнитометър модел GSM-19 (Overhauser) е монтиран стационарно в точка с минимален хоризонтален и вертикален магнитен градиент и е използван за локална базова геомагнитна станция.

## Техника на геомагнитните проучвания

Определеният за измерване участък с размери 50 x 50 m (фиг. 3) е оразмерен с помощта на рулетки, като във всяка ъглова точка от периметъра на площта е забивано по едно дървено колче. Геомагнитните работи в рамките очертанятия участък са осъществени по успоредни, отстоящи на 1 m един от друг измервателни профили. Измерванията са извършени по зигзагообразна схема с направление ЮЮИ – ССЗ, като първият профил започва от югоизточния ъгъл на площта. Последният 51-ви профил, завършва малко преди северозападния край на площта.

Придвижването на оператора на магнитометъра е осъществено по опънати от край до край рулетки, задаващи трасетата на профилите. Участъците където това бе

невъзможно (двата изкопа и храсталаците) са заобикаляни (фиг. 3).

При измерването са използвани два броя магнитометри – GSM-19TGW и GSM-19. С първия магнитометър е работено в режим „градиентометър с непрекъснат запис“ („walkmag“) и период на регистрацията 1 s (1 Hz). Вторият магнитометър е използван като базова станция с период на регистрацията 3 s (0,33 Hz).

Въз основа на регистрираните стойности на геомагнитното поле на две нива, отстоящи вертикално на 100 cm едно от друго, е определена не само големината на интензитета на геомагнитното поле, но и неговия вертикален градиент.



Фиг. 3. Разположение на геофизичните измервания в района на изследвания обект с очерчания на препятствията по терена (КС UTM 34N)

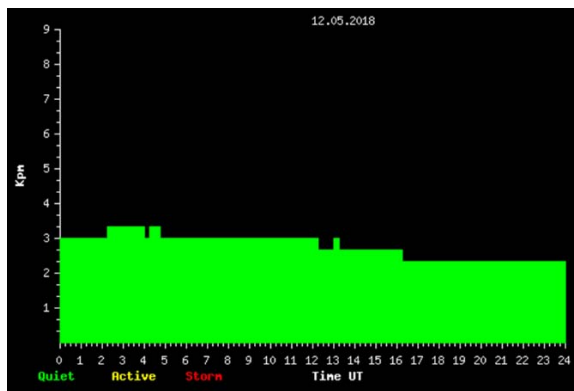
### Обработка на геомагнитните данни

След края на полевия ден геомагнитните измервания са коригирани за денонощна вариация със стойностите от базовата станция (БТ) при референтно ниво  $T_{PH} = 47\,480$  nT по формулата:

$$T_{кор} = T_{изм} - T_{БТ} + T_{PH} \quad (1)$$

След това данните от двата магнитометъра са прехвърлени на компютър за по-нататъшна обработка. Допълнително е направена справка за характера на денонощната вариация и в базата данни на Националната геомагнитна обсерватория Панагюрище (PAG). По данните от базовата станция и обсерваторията са съставени графики на вариацията, които са сравнени.

Денонощната вариация е анализирана за наличие на смущения в измереното геомагнитно поле като същевременно е направена проверка за магнитни бури на страницата на Националния институт по геофизика, геодезия и география на интернет адрес: [http://www.geophys.bas.bg/kp\\_for/kp\\_mod\\_bg.php](http://www.geophys.bas.bg/kp_for/kp_mod_bg.php) (фиг. 4). От разгледаната графика е видно, че за периода на измерванията космическата геомагнитна интензивност има спокоен характер.



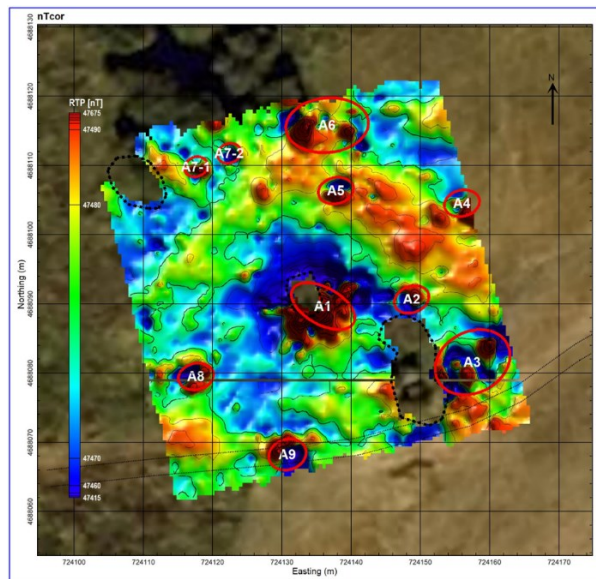
Фиг. 4. График на геомагнитната активност за 12.05.2018 г.

Коригираните стойности на геомагнитното поле  $T_{кор}$  спрямо базовата точка, както и стойностите на вертикалния градиент  $\partial T/\partial z$  са въведени в таблица по колонки със съответните координати и коти. Координатите по X и Y са въведени в проекционна координатна система UTM 34N, както и в географски координати (WGS84). Котите са геодезични (определени спрямо елипсоида). Изчислено е и аномалното геомагнитно поле  $T_a$  спрямо модела на Международното геомагнитно референтно поле, епоха 2015 (IGRF-12).

### Резултати от геомагнитните измервания

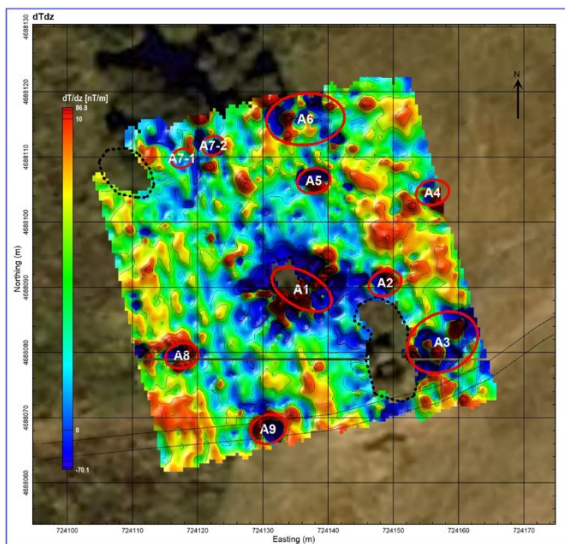
Въз основа на обработените първични данни и с помощта на софтуер за генериране на гридове (Surfer) са създадени серия от правоъгълни мрежи с гъстота на точките 0,5 x 0,5 m. Генерирани са следните базови цифрови модели на геомагнитното поле в КС UTM 34N:

- Карта на стойностите на тоталния вектор на геомагнитното поле за първото ниво (фиг. 5);
- Карта на вертикалния градиент на магнитното поле (фиг. 6).



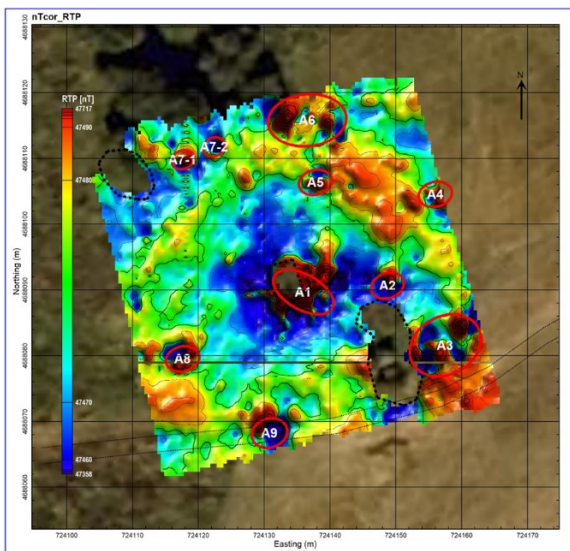
Фиг. 5. Карта на тоталния вектор на геомагнитно поле на изследвания участък





Фиг. 6. Карта на вертикалния градиент на магнитното поле

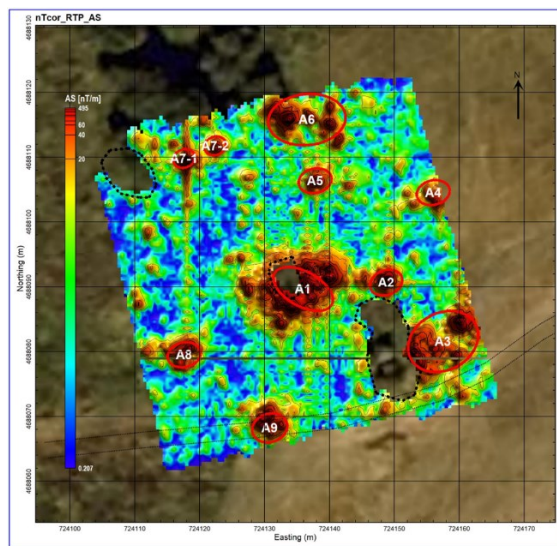
Тези базови модели послужиха като основа на всички последвали трансформации на измереното геомагнитно поле. Допълнително, с цел опростяване формата на аномалиите, беше извършена редукция на полето към полюс /RTP/ (фиг. 7). За очертаване проекцията на аномалообразуващите обекти на земната повърхност се направи и изчисление на аналитичния сигнал /AS/ (фиг. 8).



Фиг. 7. Карта на редуцираното към полюс totally геомагнитно поле за долното ниво на измерване в района на изследванията

Анализът на редуцираната към полюс картата на тоталния вектор на геомагнитното поле (фиг. 7) показва, че полето в района на изследвания участък се изменя в диапазона от 47 415 до 47 675 nT. Основният дял на интензитетът обхваща интервал от около 10 nT (47 470 – 47 480 nT). Полето в участъци, характеризиращи се със стойности попадащи в този интервал, синьо-зеленото оцветяване на фиг. 8, може да се приеме за фоново. Т.е. това са площи, в които не са регистрирани магнитни аномалии, респективно в плиткото подповърхностно пространство няма силно магнитоактивни материали. Тук

полето е представително за магнитните свойства на вместващата среда. В редица други участъци, полето със стойности под и над определените за фон, рязко се изменя, образувайки стръмни и понякога обширни аномални участъци, давайки основание да се счита, че в дълбочина се разполагат аномалообразуващи обекти с повишени магнитни свойства (метални предмети, магнитни скални късове и др.). Въз основа на пространствения анализ на измененията в стойностите на измереното и трансформираното поле са набелязани девет по-интересни аномални зони, които са нанесени и на представените по-горе карти.



Фиг. 8. Карта на аналитичния сигнал на тоталното геомагнитно поле за долното ниво на измерване в района на изследванията

Следват кратко описание с интерпретация на аномалните зони обозначени с червени елипси на картите (фиг. 5, 6, 7 и 8):

A1 – Разположена е около изкопа в централната част на площта, като продължава източно, западно и югоизточно от него. Най-вероятно указва мястото, където се намира двигателят на самолета, както и други части от корпуса.

A2 – Намира се на около 12 m източно от централния изкоп. Свързва се с наличие на плитък железен предмет – вероятно част от самолета.

A3 – В югоизточния край на площта, в участък със струване на отпадъци от земеделската дейност (клони, камъни, сено и др.) се очертава група аномалии, вероятно свързани с натрупания в участъка край пътя боклук. Следва да се провери за метални отпадъци или магнитни скални блокове.

A4 – В средата на източния контур на площта се регистрира аномалия, вероятно скален къс с повишени магнитни свойства или плитък съвременен метален предмет.

A5 – На около 12 m северно от централния изкоп, в близост до яма се отделя аномалия, която е причинена от малък плитък метален предмет – възможно е да е част от самолета.

A6 – Около корените на дърветата в североизточния край на площта се регистрират множество дребни и интензивни аномалии, които са причинени от множество

плитки метални предмети – възможно е да са съвременни метални отпадъци или дребни детайли от самолета.

A7 (1 и 2) – В рамките на насипа от изкопа в северозападния край на площта се локализиращат две малки аномалии – плитките метални предмети – най-вероятно съвременни отпадъци.

A8 – В нивата на около 20 m югоизточно от централния изкоп се очертава обширна аномална зона. Смутителят вероятно е недълбок сравнително голям метален предмет – възможен съвременен обект.

A9 – Плитък сравнително голям магнитоактивен предмет локализиран под южната ос на черния път. Разположението му край пътя дава основание да се счита, че става въпрос за съвременен отпадък.

Централните точки на описаните аномални зони са отбелязани на терен с номерирани дървени табели, които да насочват последвалите изкопни работи. При тяхното разкопаване бе открит двигателят на изстребителя, различни видове амуниции, части от корпуса и други елементи от летателната машина.

## Резултати

В резултат на бързата реакция и добрата координация между всички ангажирани в локализирането, разкопаването и съхраняването на находката институции и специалисти, останките от изстребителя Месершмит 109 G6, намерени в землището на с. Марица, бяха изкопани, транспортирани и предадени на Националния военноисторически музей за по-малко от две седмици (фиг. 9).



Фиг. 9. Момент от разтоварването на двигателя на изстребителя в двора на НВИМ (НВИМ, 2018)

След извършената реставрация, двигателят на самолета е представен във временната изложба на НВИМ, а след нейното закриване ще стане част от фонда на музея. Подробна научна публикация за открития изстребител Месершмит 109 G6, както и за неговия произход все още не е публикувана официално, но и това предстои да бъде направено след изясняване на фактите и приключване на анализа на налична информация в Държавния военен архив в гр. Велико Търново.

## Заклучение

В землището на с. Марица, обл. Самоков, са проведени детайлни геомагнитни изследвания със задача търсене и локализиране на аномални участъци в магнитното поле, които биха могли да бъдат причинени от наличието на скрити под земната повърхност отломки от разбил се през

Втората световна война изстребител Месершмит 109 G6, останки от който са открити няколко дни по-рано при изкопни работи за отводняване на терен.

Полевите геофизични данни са обработени, анализирани и интерпретирани. Във връзка с това могат да бъдат направени следните основни обобщения:

- Участък с размери 50 x 50 m, е проучен с магнитометър – магнитопроучване в модификация геомагнитна градиентометрия.
- Въз основа на обработените и интерпретирани геомагнитни данни са набелязани девет аномални участъка.
- На терен, участъците са локализиращани, маркирани и номерирани с дървени колове с надписи.
- Изкопните работи в посочените участъци подпомага откриването на двигателят и други елементи от самолета.

В тази връзка може да се заключи, че магнитометричният метод, използван за локализиране местоположението на отломките от сваления изстребител, осигури насочващи и надеждни резултати. Това, в съчетание с ефективното взаимодействие между институциите допринесе за провеждането и финализирането в най-кратки срокове на цялата кампания по разкопаване, транспортиране и съхраняване на ценните останки от самолета Месершмит 109 G6.

## Благодарности

Издавам благодарност за съдействието и предоставената информация на ръководството на Националния военноисторически музей.

## Литература

- Benson, R., Glaccum, R., Noel, M. (1984). Geophysical Techniques for Sensing Buried Waste and Waste Migration. EPA-600/7-84-064. p. 256. <https://nepis.epa.gov/Exec/ZyPURL.cgi?Dockey=P1007SIO.txt>
- Жеков, В. (2018, май 11). Откриха Месершмит на загинал герой. Вестник Българска Армия. <https://armymedia.bg/>
- Кисьов, К., Ат. Кисьов, С. Христева. (2020). Геофизични проучвания на обект „Тракийски селищен център от V в. пр. Хр.“ до с. Васил Левски, общ. Карлово, обл. Пловдив. Археологически открития и разкопки през 2019 г., кн. I, Изд. Булгед ООД, София, стр. 450 – 454.
- НВИМ (2018, май 21). Останките от самолет Месершмит 109 G6 са вече в НВИМ. НВИМ. Новини. <https://militarymuseum.bg/novini/2018/05/21/ostankite-ot-samolet-mesersshmit-109-g6-sa-veche-v-nvim/#>
- Сапунджиева, И., Ташков, Ц. (2018, май 10). Находка от Втората световна война – останки от „Месершмит БФ 109“ са открити в село Марица. ВТК. [https://www.youtube.com/watch?v=aER3c7s94i8&t=6s&ab\\_channel=ВОЕНЕНТЕЛЕВИЗИОНЕНКАНАЛ](https://www.youtube.com/watch?v=aER3c7s94i8&t=6s&ab_channel=ВОЕНЕНТЕЛЕВИЗИОНЕНКАНАЛ)
- Тонков, Н. (2013). Геофизични методи в археологията оптимизиране на методиката за проучване на надгробни могили. *Българско е-Списание за Археология, т. 2, Изд. Асоциацията на българските археолози*, София, 403 стр.
- Цанков, Хр., М. Янкова. (2013). Георадарът навлиза широко в полевата геофизиката. *Минно дело и геология, т. 5/6*, стр. 31-35.





**СЕКЦИЯ**

**МЕХАНИЗАЦИЯ, ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ И  
АВТОМАТИЗАЦИЯ НА МИНИТЕ**

**SECTION**

**MINE MECHANISATION, ELECTRIFICATION,  
AND AUTOMATION**



## PECULIARITIES OF OPTIMISATION TASKS IN INTELLIGENT SYSTEMS

*Kremena Arsova-Borisova, Veselin Hristov*

*University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: kremena.arsova@mgu.bg, veso@mgu.bg*

**ABSTRACT.** The distinctive characteristics of the optimisation tasks of intelligent systems are described. The focus is on specific problems and their solutions through heuristic and metaheuristic approaches, adaptive algorithms, and hybrid models.

Key words: intelligent systems, optimisation, algorithms, AI

### ОСОБЕНОСТИ НА ОПТИМИЗАЦИОННИТЕ ЗАДАЧИ ПРИ ИНТЕЛИГЕНТНИТЕ СИСТЕМИ

*Кремена Арсова-Борисова, Веселин Христов*

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

**РЕЗЮМЕ.** Описани са отличителните характеристики на задачите за оптимизация на интелигентните системи. Фокусира се върху специфичните проблеми и техните решения чрез евристични и метавейристични подходи, адаптивни алгоритми и хибридни модели.

Ключови думи: интелигентни системи, оптимизация, алгоритми, изкуствен интелект

#### Въведение

През последните години в много от компютърните системи се влагат средства от изкуствения интелект. Целта е развитие на информационните технологии на ново интелигентно ниво, а компютърните системи да станат по-полезни. Това могат да са софтуерни системи от различни видове, като се започне от операционни системи, системи за работа в офиса, системи за инженерно проектиране и се стигне до информационно търсещи системи, системи за подпомагане взимане на решения и много други. Средства на изкуствения интелект се влагат и при управлението на технологични процеси, транспортни средства и системи, роботизирани комплекси, автономни машини като автомобили, дронае, минно-добивни машини и др. Прието е всички тези системи с изкуствен интелект да се наричат интелигентни системи.

Интелигентната система (ИС) е сложна компютърна система, която може да придобива, анализира и отговаря чрез данните, които събира от заобикалящата я среда и да имитира определени аспекти на човешкия интелект. Тя може да работи и да комуникира с други агенти, например потребители или други компютърни системи. Може да се учи от опита си и да се адаптира според текущите данни. ИС може да поддържа дистанционно наблюдение и управление.

#### Оптимизация на интелигентни системи

Различни аспекти от функционирането на интелигентните системи могат да бъдат оптимизирани с цел подобряване на производителността, ефективността, надеждността и удовлетворението на потребителите. Например:

- Подобряване на дизайна на системата – може да включва идентифициране и елиминиране на пречките и неефективността в архитектурата и алгоритмите на системата.

- Използване на по-ефективни представяния на данни - това може да е използване на по-компактни представяния на данни или използване на такива, които са по-подходящи за конкретните задачи, които системата трябва да изпълни.
- Използване на по-ефективни алгоритми - търсят се алгоритми, които могат да решат задачите на системата по-бързо и точно.
- По-добро обучение на системата - може да помогне на системата да научи по-сложни модели и връзки в данните, което може да доведе до подобрена производителност.
- Постигане на хардуерно ускорение - включва използването на специализиран хардуер, като GPU (Graphics processing unit) или FPGA (Field programmable gate array - програмируема логическа матрица), за ускоряване на изпълнението на алгоритмите на системата.

Възможно е да се оптимизират и конкретни елементи на интелигентната система, както и аспекти от тяхното функциониране. Например:

- Компресия на модела - намалява се размерът на модела за машинно обучение, без да се жертва твърде много производителност. Може да се направи чрез техники като подрязване, квантуване и извличане на знания.
- Избор на алгоритъм - включва избор на правилния алгоритъм за конкретна задача, като се вземат предвид фактори като вида на данните, желаната точност и наличните изчислителни ресурси.
- Многопараметрична оптимизация - извършва се настройка на параметрите на алгоритъма за машинно обучение, за да се постигне възможно най-добра производителност. Това може да се направи ръчно или с помощта на автоматизирани техники като например байесова оптимизация.
- Аугментация (увеличаване) на обучаващи данни - създават се нови данни за обучение от съществуващи данни чрез прилагане на различни техники и трансформации, като изрязване,

обръщане и завъртане на изображения, промени в яркостта, контраста и наситеността и др. Това може да помогне на системата да се обучи да прилага по-ефективни модели, които са по-малко склонни към пренастройване или преобучение.

- Ансамбълно обучение - включва комбиниране на прогнозите на множество модели на машинно обучение, за да се получи по-точна прогноза. Може да се направи чрез техники като опаковане, подсилване и подреждане.
- Потребителски интерфейси - намаляване на времето, необходимо на системата да реагира на действията на потребителя; подобряване на интуитивността на използване на интерфейсите; осигуряване на достъпност за потребители с различни потребности.
- Комуникационни мрежи - оптимизиране на скоростта на пренос на данни за максимизиране на ефективността на честотната лента и минимизиране на претоварването на мрежата; намаляване на забавянето на комуникацията между компонентите на системата за подобряване на цялостната ѝ реакция.

Оптимизирането на интелигентните системи допринася за цялостното повишаване на тяхната полезност, ефективност, надеждност и скалируемост.

### Особености на оптимизационните задачи в интелигентните системи

При оптимизацията на интелигентни системи могат да се прилагат традиционните методи като: линейно и нелинейно програмиране, динамично оптимизиране, оптимален контрол и др. Оптимизацията може да бъде чрез формални и неформални (евристични) методи. Оптимизационните задачи в ИС се характеризират с някои особености, които ги отличават от традиционните оптимизационни задачи. Тези особености могат да бъдат класифицирани най-общо в три категории:

- Висока (голяма) размерност и сложност;
- Несигурност и непълна информация;
- Ограничения в реално време;

#### Висока размерност и сложност

Високата размерност и сложност в задачите за оптимизиране на ИС са критична област на изследване на изкуствения интелект (AI). Тъй като AI системите стават все по-сложни и се прилагат към по-сложни проблеми, броят на променливите и сложността на връзките между тях могат да нараснат експоненциално. Това може да направи трудно или дори невъзможно традиционните алгоритми за оптимизация да намерят оптималното решение. Първо, пространството за търсене нараства експоненциално с броя на променливите, което затруднява изчерпателното търсене на оптималното решение. Второ, високата размерност кара традиционните алгоритми за оптимизация да станат изчислително претоварващи. Трето, високата размерност може да доведе до преобучение, при което алгоритъмът за оптимизация се

адаптира към данните за обучение твърде добре и губи своята способност да обобщава.

Сложността се отнася до нелинейността и неизпъкналост на целевата функция. Нелинейността означава, че връзката между входните променливи и изхода не е линейна, а неизпъкналостта означава, че целевата функция има множество локални оптимуми. Тези свойства могат да затруднят алгоритмите за оптимизация да намерят глобалния оптимум, който е най-доброто възможно решение.

Съществуват различни подходи за справяне с високата размерност и сложност в оптимизационните задачи за ИС. Тези подходи могат да бъдат категоризирани в три класа:

- Намаляване на размерността - включва намаляване на броя на променливите чрез идентифициране и премахване на излишни или неподходящи характеристики. Това може да се направи с помощта на техники като подбор на характеристики, анализ на главни компоненти (PCA) и анализ на независими компоненти (ICA).
- Метаевристични - това са алгоритми за търсене, които са проектирани да изследват ефикасно пространството за търсене, дори за големи и сложни проблеми. Метаевристичните могат да бъдат класифицирани в няколко категории, включително симулирано закаляване (simulated annealing), генетични алгоритми и еволюционно програмиране.
- Ансамбълни методи - включват комбиниране на множество оптимизационни алгоритми за подобряване на цялостната производителност. Ансамбълните методи могат да се използват за комбиниране на различни типове алгоритми, като метаевристични и детерминирани алгоритми.

Симулираното закаляване е вероятностна техника за приближаване на глобалния оптимум на дадена функция в голямо пространство за търсене. При голям брой локални оптимуми може да се намерят глобални оптимуми. Често се използва, когато пространството за търсене е дискретно (например проблемът с търговския пътник, проблемът с булевата задоволителност, прогнозирането на структурата на протеина и планирането на работния график).

Примери за високата размерност в задачи за оптимизация на ИС:

- Хиперпараметрична настройка - включва намиране на оптималните стойности за параметрите на модел на машинно обучение. Това е многоизмерна и сложна оптимизационна задача и са разработени различни подходи за справянето с нея, включително метаевристични, ансамблови методи и байесова оптимизация.
- Обучение за невронни мрежи - невронните мрежи са мощни модели за машинно обучение, които могат да се използват за решаване на голямо разнообразие от проблеми. Невронните мрежи също са многомерни и сложни и обучението им е трудна задача за оптимизиране. Разработени са различни подходи за обучение на невронни мрежи, включително градиентно спускане, стохастично градиентно спускане и адаптивни алгоритми за скорост на обучение.
- Роботика - роботите са сложни системи, които трябва да изпълняват различни задачи в реалния свят. Това изисква от тях да решават различни



проблеми с оптимизацията, включително планиране на движението, оптимизация на траекторията и планиране на манипулация. Високата размерност и сложност са често срещани трудности при тези задачи и са разработени различни подходи за справяне с тях, включително метаевристики, оптимизация в реално време и хибридни алгоритми за оптимизация.

### Несигурност и непълна информация

Несигурността и непълната информация са повсеместни в проблемите от реалния свят и предизвикват значителни трудности при оптимизирането на ИС. Когато вземат решения в условия на несигурност, те трябва да имат предвид потенциалните последици от своите действия и да направят информиран избор в условията на непълно знание. Могат да се посочат следните източници на несигурност и непълна информация при ИС:

- Шум на сензори и грешки при измерване - сензорите може да предоставят неточни или изкривени данни поради фактори на околната среда, хардуерни ограничения или проблеми с калибрирането.
- Ограничена наличност на данни - в много сценарии от реалния свят наличните данни може да са недостатъчни, за да характеризират напълно проблема или да предскажат точно резултатите от различни действия.
- Динамични среди - средата, в която работи една интелигентна система, може да се промени с времето, внасяйки несигурност относно текущото състояние и бъдещите развития.

Несигурността и непълната информация могат значително да повлияят върху оптимизирането на ИС. Негативните влияния могат да бъдат:

- Намалена точност - алгоритмите за оптимизация, които разчитат на пълна и точна информация, могат да доведат до неоптимални решения, когато са изправени пред несигурност.
- Повишена изчислителна сложност - справянето с несигурността често изисква по-сложни алгоритми и изчислителни ресурси, което води до увеличени изчислителни разходи.
- Трудности при оценяването на производителността - оценяването на производителността на ИС при несигурност може да бъде трудно, тъй като истинските резултати не винаги могат да бъдат наблюдавани.

Съществуват различни начини за справяне с несигурността. Например:

- Вероятностна оптимизация - алгоритмите за вероятностна оптимизация добре моделират несигурността чрез присвояване на вероятности на различни резултати или състояния на системата. Това им позволява да вземат по-адекватни решения при несигурност.
- Робустна оптимизация - алгоритмите за робустна оптимизация имат за цел да намерят решения, които са нечувствителни към смущения в системата или към промени в наличната информация.

- Адаптивна оптимизация - алгоритмите за адаптивна оптимизация коригират поведението си въз основа на текущото състояние на системата и наличната информация. Това им позволява да реагират ефективно на промените и несигурността.

Различни ИС се сблъскват с несигурна и непълна информация, като например:

- Роботика - роботите трябва да работят в несигурна среда и да вземат решения въз основа на непълни данни от сензори.
- Системи за медицинска диагноза - медицинската диагноза често включва работа с несигурна или двусмислена информация от данни на пациенти и диагностични тестове.
- Системи за финансово прогнозиране - включва прогнозиране на бъдещи пазарни условия и цени на активите, които по своята същност са несигурни.
- Автономни превозни средства - те трябва да се движат в динамични и несигурни среди, като вземат решения в реално време въз основа на непълни данни.

### Ограничения в реално време

Оптимизирането на ИС, работещи в реално време е от решаващо значение, за да могат те да вземат информирани решения и да работят ефективно в динамични и ограничени във времето среди. Този процес на оптимизация обхваща различни аспекти, включително разпределение на ресурси, избор на подходящ алгоритъм и адаптиране към променящите се условия.

ИС често работят с ограничени изчислителни ресурси, като мощност на обработка и памет. Оптимизирането на разпределението на ресурсите гарантира, че тези ресурси се използват ефективно за максимизиране на производителността на системата. Това включва техники като планиране на задачи, балансиране на натоварването и приоритизиране на задачите въз основа на тяхната важност и спешност.

Изборът на подходящите алгоритми, използвани в ИС в реално време, играе важна роля в тяхната оптимизация. Критериите за избор включват изчислителна сложност, точност и адаптивност към ограничения в реално време. Евристиката, метаевристиката и онлайн алгоритмите са често използвани подходи, всеки със своите силни страни и ограничения. Евристиката предлага бързи решения, но може да не е оптимална, докато метаевристиката предоставя по-добри решения, но може да изисква повече време за изчисление. Онлайн алгоритмите получават входните си данни прогресивно във времето и се адаптират към промените в реално време, но може да се борят със сложни проблеми с оптимизацията (Cormen et al., 2022).

Средите, в които работят системите в реално време, са по своята същност динамични и ИС трябва да се адаптират към променящите се условия, за да поддържат своята ефективност. Тази адаптация включва непрекъснат мониторинг на производителността на системата, факторите на околната среда и изискванията на задачите. След това системата трябва да коригира съответно поведението си, потенциално модифицирайки своите алгоритми, разпределение на ресурси и процеси на вземане на решения.

Оптимизирането на ИС работещи в реално време се сблъсква с редица проблеми като:

- Изчислителна сложност - изискванията за работа в реално време често водят до ограничаване на сложността на оптимизационните алгоритми.
- Несигурност и шум - данните от реалния свят често са изкривени и несигурни, което прави трудно разработването на стабилни алгоритми за оптимизация.
- Адаптивност към променящи се среди - системите трябва да се адаптират към динамични среди без компромис с производителността.

Прилагат се различни оптимизационни техники при ИС работещи в реално време:

- Прогнозиране управлението на модела - тази техника включва прогнозиране на бъдещото поведение на системата и оптимизиране на управленските действия въз основа на тези прогнози. Това управление е особено полезно в системи с известна динамика и предвидими смущения.
- Алгоритмите за подсилено обучение - ИС се тренират чрез взаимодействие по метода проб-грешка със средата, като постепенно те подобряват политиките си за вземане на решения. Те са много подходящи за оптимизационни проблеми в реално време със сложна динамика и несигурност.
- Невро-оптимизация - този подход съчетава невронни мрежи с оптимизационни алгоритми за решаване на сложни проблеми. Невронните мрежи могат да извличат модели и връзки от данни, докато оптимизационните алгоритми намират оптимални решения въз основа на тези модели.
- Разпределена оптимизация - в разпределените системи оптимизационните алгоритми се разпределят между множество агенти, за да се справят с мащабни проблеми и да подобрят скалируемостта. Агентите комуникират и си сътрудничат, за да намерят колективно оптималното решение.

Бъдещи изследвания в областта на оптимизирането на ИС работещи в реално време:

- Разработване на по-ефективни и мащабируеми алгоритми за оптимизация за приложения в реално време.
- Изследване на техники за справяне с несигурност и шум при оптимизация в реално време.
- Проектиране на адаптивни стратегии за оптимизация, които могат да реагират ефективно на променящите се среди.
- Проучване на интегрирането на машинно обучение и оптимизация за вземане на решения в реално време.

## Оптимизационни алгоритми за интелигентни системи

За справяне с особеностите при оптимизиране на ИС са разработени различни алгоритми специално за тази цел. Тези алгоритми често са вдъхновени от природни процеси или биологични явления, като еволюция, търсене

на храна за животни или невронни мрежи. Някои примери за оптимизационни алгоритми, използвани в ИС, включват:

- Генетични алгоритми - те са вдъхновени от процеса на естествен подбор и използват популация от кандидат-решения, за да се развият към оптимално решение. Използват се техники като кръстосване и мутация, за да се развият по-добри решения в следващите поколения (Heaton, 2014).
- Оптимизация на рояк частици - тя симулира социалното поведение на птици ята и стада риби и използва рояк частици, за да изследва пространството за търсене и да намери оптимални решения.
- Оптимизиране на колонии от мравки - произтича от поведението на мравките при търсене на храна и използва феромони, за да насочва търсенето на оптимални решения. Феромоните са летливи химически вещества, синтезирани в насекомото и се използват за комуникация с други насекоми от същия вид. Феромоните могат да бъдат полови феромони, които да привличат противоположния пол, алармени феромони, които да предупреждават членовете на групата и феромони, обозначаващи пътища (Iba Hitoshi, 2020).
- Подсилено обучение - вид машинно обучение, което включва обучение чрез проба и грешка. При обучението с подсилване агентът взаимодейства с околната среда и получава награди за предприемане на действия, които водят до желани резултати.

Изборът на алгоритъм за оптимизация за конкретен проблем зависи от специфичните характеристики на проблема, като размерност, ниво на несигурност и времеви ограничения.

## Метаевристични алгоритми

Метаевристичните алгоритми (metaheuristic algorithms) са алгоритми за математическа оптимизация, които се характеризират със силна нелинейност, множество параметри, разнообразни сложни ограничения за удовлетворяване и множество, често противоречащи си, оптимизационни критерии. Дори и при един оптимизационен критерий е възможно изобщо да не съществуват оптимални решения и като цяло откриването на оптимално или дори близко до оптималното решение е трудно постижимо.

Двата основни компонента на всеки метаевристичен алгоритъм са: интензификация и диверсификация (intensification and diversification), или още изследване и експлоатация (exploration and exploitation).

Диверсификацията означава да се генерират разнообразни решения, така че пространството на търсене да може да бъде проучвано в широк диапазон, докато интензификацията означава да се фокусира търсенето в локален регион, знаейки, че текущото най-добро решение се намира в този регион.

При подбора на най-добрите решения трябва да се открие добър баланс между интензификацията и диверсификацията с цел да се подобри скоростта на сходимост на алгоритъма. Изборът на най-доброто текущо решение осигурява, че решенията ще сходят към оптимум, докато диверсификацията посредством

рандомизация (т.е. избор на случайни стойности на променливи) позволява да се избегне попадането в локален екстремум и в същото време да се повиши разнообразието на решението. Добрата комбинация от тези два основни компонента обичайно води до намиране на глобален оптимум.

### **Заклучение**

Разгледаните особености при оптимизацията на интелигентните системи показва, че постигането на висока ефективност и производителност поставя големи предизвикателства пред разработчиците. Систематизирани са различните видове проблеми при оптимизацията и са предложени някои методи и алгоритми

за справяне с тях. Имайки предвид, че интелигентността става една от основните характеристики на софтуера, постигането на оптимални реализации би имало голям ефект.

### **Литература**

- Cormen, T. H., Leiserson, C. E., Rivest, R. L., Stein, C. (2022). Introduction to algorithms, MIT Press, ISBN 9780262046305
- Heaton, J. (2014). Artificial Intelligence for Humans, Volume 2: Nature-Inspired Algorithms, ISBN 978-1499720570.
- Iba Hitoshi. (2020). AI and SWARM: Evolutionary Approach to Emergent Intelligence, CRC Press, ISBN 13: 978-0-367-13631-4.

## SHORT-TERM PLANNING AND OUTLINING A FEASIBLE SCHEDULE OF MINING ACTIVITIES IN THE ELATZITE MINE USING THE HXGN MINEPLAN™ ACTIVITY SCHEDULER

Ivan Boykov, Valentin Vazharov

Mining Complex, Ellatzite-med AD, 2180 Etropole; E-mail: i.b.dimitrov@ellatzite-med.com; v.v.vazharov@ellatzite-med.com

**ABSTRACT.** Ore mining is essential for global economy and, based on the increased need of metals worldwide, all deposits should be exploited in the most efficient way. Hence, short-term planning of mining activities is of key importance for the successful management of open-pit and underground mines. *MinePlan Activity Scheduler* combines activity-based scheduling, resource assignment, and Gantt charting with an easy-to-use interface. The planning module features direct cut design against the block model, with the ability to route material to certain destinations, including reclamation. The use of these software tools facilitates the accurate and reliable planning and the efficient management of mining operations.

**Key words:** open-pit mining, short-term planning, MinePlan Activity Scheduler, Gantt chart, material movement.

### КРАТКОСРОЧНО ПЛАНИРАНЕ И СЪЗДАВАНЕ НА РЕАЛИСТИЧЕН ГРАФИК НА ДОБИВНИТЕ ДЕЙНОСТИ В РУДНИК „ЕЛАЦИТЕ“, ПОСРЕДСТВОМ HXGN MINEPLAN™ ACTIVITY SCHEDULER

Иван Бойков, Валентин Вържаров

Рудодобивен комплекс, Елаците-мед АД, 2180 Етрополе

**РЕЗЮМЕ.** Добивът на руда е от съществено значение за глобалната икономика и въз основа на увеличената необходимост от метали в световен мащаб е важно всички находища да бъдат експлоатирани по най-ефективен начин. Поради тази причина, краткосрочното планиране играе ключова роля за успешното управление на открити и подземни рудници. MinePlan Activity Scheduler съчетава планиране на минните дейности, разпределяне на наличната минно-добивна техника и изработка на линеен график, чрез удобен за работа интерфейс. Модулът за планиране позволява създаване на планови полигони, на база блоков модел, с възможност за проектно разпределяне на минната маса до съответните разтоварни пунктове. Използването на тези софтуерни инструменти спомага за точно и надеждно планиране и ефективно управление на минно-добивните дейности.

**Ключови думи:** открит добив, краткосрочно планиране, MinePlan Activity Scheduler, линеен график, разпределяне на минната маса

### Въведение

Минното планиране се дефинира като процес от минното инженерство, отговарящ за усвояване на минералните ресурси по най-продуктивен начин, докато календарният график за добив е едно добро пожелание, което съответства на борсовите и банкови договори на инвеститорите (Smith, 1998). В този смисъл, целта на минното планиране е да определи изземването на запасите във всеки един период, за да се достигне максимална печалба от преработката, включително коя част от запасите трябва да бъде преработена, изискванията за транспортната механизация, необходимите инвестиции за обогатителната фабрика и др.

Процесът на планиране в мината се извършва като се вземат предвид оперативните и металургичните ограничения. Изготвянето на краткосрочни и средносрочни планове за добив, чрез наличните софтуерни продукти, налага разработване на различни алтернативи, които да оптимизират резултатите по отношение на извлечения метал, използването на изкопно-товарната и транспортна техника, както и правилното технологично отработване на мината. И тъй като е изключително трудно да се вземат предвид всички променливи и тяхната взаимовръзка, за да се визуализира в една платформа, „се обръщаме“ за помощ към специализиран минен софтуер.

В рудник „Елаците“, за целите на планирането, както дългосрочно, така и краткосрочно, се използва специализиран минен софтуер на компанията Hexagon,

лидер в дигиталните решения, съчетаващи сензорен, софтуер и автономни технологии. По отношение на краткосрочното планиране, компанията разработва модул MinePlan Activity Scheduler, който улеснява работата по задаване последователността на изземване, разпределяне на изкопно-товарната техника, изчисляване на транспортната работа и изчисляване необходимия брой автосамосвали. Чрез създаването на линеен график, към добивните дейности се включва продължителността на пробивно-взривни работи, на база производителността на сондажното оборудване, планирани и извънредни ремонти, регламентирано време, в което не се извършват минни дейности и др. Алгоритмите и значителното подобрение в изчислителната мощ на компютърната техника, позволяват генериране на множество варианти и алтернативи, целящи коректно достигане на зададените параметри (обеми, тонове и съдържания), както и безопасното отработване на находището. Форсмажорните обстоятелства, възникнали по време на оперативните дейности, биват отбелязвани в графика, което води до по-правилно управление на процесите. Така събраната и генерирана информация от линейния график, дава възможност на минните инженери от отдел „Минно планиране“ да представят краткосрочното развитие на минно-добивните дейности пред ръководството на компанията.

В настоящия доклад ще бъде представена последователността при изготвяне на краткосрочен план на минно-добивните дейности за период от 1 месец. В среда на MinePlan Activity Scheduler е съставен оперативен план с линеен график, който изобразява

продължителността на основните минни дейности. Резултатът представя транспортната работа, необходимият брой автосамосвали и продължителността на минно-технологичните дейности за постигане на заложените цели (натурални показатели).

### Входни данни

Краткосрочното планиране цели да следва стратегията на дългосрочното планиране и да минимизира оперативните разходи (Osanloo & Rahmipour, 2017). Ролята на минния инженер е да определи оптималното количество материал, който трябва да бъде добит от всеки етап на мината, така че обогатителната фабрика да получи руда с необходимото качество и обем. Входната информация трябва да бъде определена, спрямо наличните данни, преди планиране.

За основни, се считат следните геометрични и геоложки параметри:

- Бортово съдържание на  $Cu\%$  за определяне на видовете минна маса;
- Планово количество и качество на рудата, както и количество на откривката за съответния месец;
- Актуален блоков модел - обединява информация от ресурсен модел и експлоатационно проучване;
- Актуална маркшайдерска повърхнина на рудника;
- Проектна повърхнина към края на година (краен контур).

От гледна точка на механизацията и достъпността на минното оборудване, е необходима информация за:

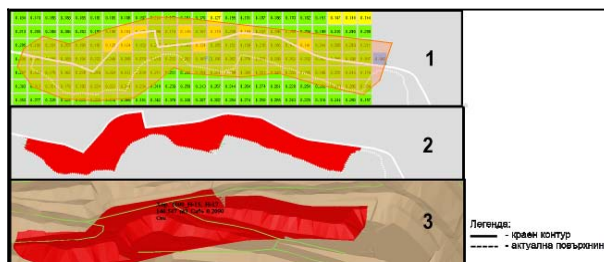
- Планирани ремонти на изкопно-товарната и транспортната техника;
- Планирани ремонти на сондажното оборудване;
- Планирани ремонти на корпусите за трошене на рудата.

При създаване на краткосрочен план за добив е важно да се обърне внимание и на непредвидими фактори, които биха повлияли на производството. Те могат да бъдат от различно естество и характер, но най-често при открития добив се наблюдават минно-технологични и метеорологични. Залагането на песимистични данни за минно-добивните процеси намаляват риска от неизпълнение на плановите показатели, като това се прави по преценка на минния инженер.

### Моделиране на добивните дейности

Планирането на различни варианти на минно-добивните дейности е ключов елемент при разглеждане развитието на рудника в краткосрочен период. Минният софтуер е разработен и усъвършенстван, така че да позволява бърза оценка и съответно вземане на решение от ръководния персонал накъде да бъде насочен добивът. Процеса по планиране се извършва в 2D, но всички резултати от изчисленията, са на база актуална повърхнина и актуален блоков модел (Фиг. 1).

За съответното обемно тяло (солид) се изчислява неговите обем, маса, съдържание на метал и др. (Фиг. 2), като тези данни се генерират на база блоковия модел и кодираната в него информация.



Фиг. 1. Изглед на хоризонтен план на рудника и актуален блоков модел- използван за планиране, където: 1 – ръчно изчертаване на планов полигон; 2 – коригиран полигон спрямо актуална и проектна повърхнина; 3 – проектно обемно тяло (солид) за добив

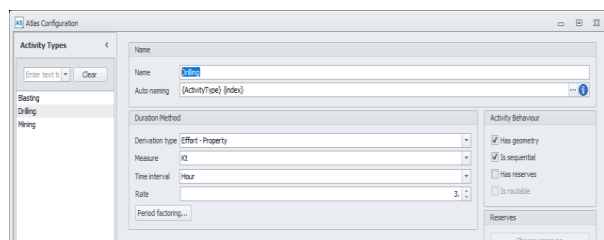
Name	Depth	Volume	Weight	Grade	Grade	Grade	Grade	Grade	Grade
EXPLORATION HILL	100	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000
EXPLORATION HILL	100	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000

Фиг. 2. Табличен вид с информация за обем, тегло, средно съдържание  $Cu\%$  на полигона/солида и др.

В резултат на проектирането се получава планова повърхнина на рудника, която отчита добивните дейности и визуализира в какво положение ще бъдат рудничните пътища, работните площадки, наклонените полутраншеи в края на периода.

Activity Scheduler дава възможност дейностите в рудника да бъдат планирани като група от последователни действия - подготовка на масива (пробивно-взривни работи) и изземване на минната маса (добивни работи). В настоящата разработка няма да бъдат разгледани и коментирани дейностите по подготовка на дадено поле в детайли (маркшайдерска снимка, технологично почистване на площадката и др.).

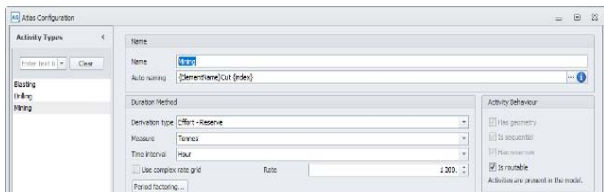
Планирането на пробивно-взривните работи е съобразено с наличната техника, персонал и технически параметри на сондите - производителност (хил. t/h) (Фиг. 3). На този етап, в рудник „Елаците“, проектирането на взривните работи не се извършва в среда на MinePlan. За работата на софтуера се прилагат обобщени данни за производителността на база досегашния опит.



Фиг. 3. Задаване на базова производителност на сондажното оборудване

Задава се планова производителност на изкопно-товарната техника (Фиг. 4), за да бъде изчислено времето, за което ще бъде добита планираната минна маса. Коефициенти на ефективност и ефикасност се прилагат впоследствие, които отчитат времето за технологичен престой, изчакване, аварийни ремонти и др.





Фиг. 4. Задаване на технологична производителност на изкопно-товарната техника

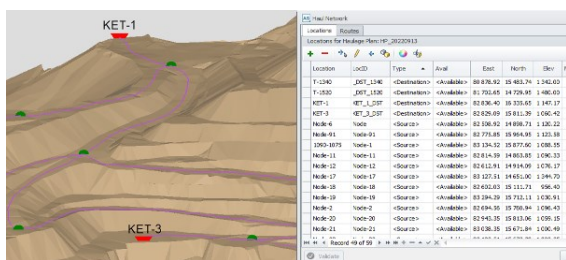
### Определяне и дефиниране на разтоварните пунктове

Капацитетът и местоположението на разтоварните пунктове са неразделна част от процеса планиране и изграждане на краткосрочен график. В ранен етап, преди започване на изпълнение на плана, се вижда какво е очакваното количество минна маса, която ще приеме всеки един от тях (Workbook, 2023). Местоположението им може да бъде посочено в модела, както и от модула Haulage, съдържащ геометрична информация за рудничните кръстовища и пътища. Проектирането на съоръжението за минни отпадъци се извършва с друг инструмент в Mine Plan, като геометрията му се посочва с цел отчитане във всеки един момент от зададения период, количеството насипана откритка и оставащия обем до запълването му.

При рудник „Елаците“, разтоварните пунктове са разделени на две категории:

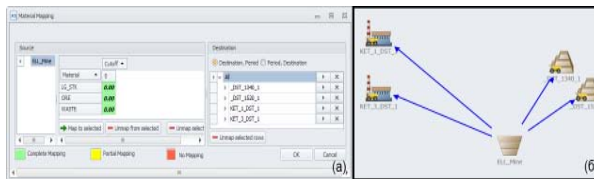
- по руда – Корпус едно трошене – 1 и 3 (KET-1 и KET-3);
- по откритка – съоръжение за минен отпадък, като са определени 3 места за насипване (T-1340, T-1340-1 и T-1520).

Местоположението им е определено в Haulage с координати и наименования (Фиг. 5), като за откритката не е определен проектният обем на насипището. Поради факта, че корпусите за едро трошене имат технически капацитет, за тях е зададена средно-дневната производителност, отчетена за последната 1 година.



Фиг. 5. Графично и таблично местоположение на разтоварни пунктове (KET-1 и KET-3)

Разпределянето на вида минна маса се осъществява предварително, за да се покаже всеки вид материал на кой разтоварен пункт трябва да бъде закаран. MinePlan Activity Scheduler е софтуер за ръчно планиране, така че логиката за проектно разпределяне на минната маса се въвежда от потребителя (Workbook, 2023). Съставя се диаграма и таблица с разпределение на материала (Фиг. 6), което служи на алгоритъма да изчисли транспортната работа, циклите на движение на автосамосвалите и правилно да бъде определен броят автосамосвали, необходими за извършване на планираната работа.



Фиг. 6. Таблично (а) и схематично (б) разпределение на видовете минна маса спрямо разтоварните пунктове

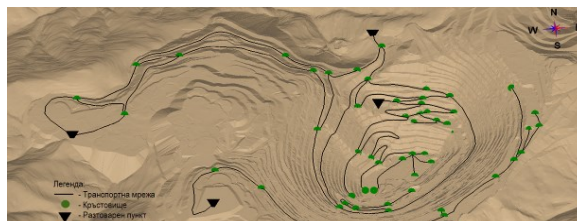
Важен аспект при планирането е определянето на ограничения на производителност/капацитет за всеки разтоварен пункт (Фиг. 7). Целта е да се получи правилно разпределение на минните маси от всеки участък. Задават се минимални и максимални тонажи/обеми и други атрибути, дефинирани в блоковия модел, служещи за ограничения (Workbook, 2023).

Destination	From	To	Grade	Constraint Type	Lower	Upper	Capped
KET_1_DST_1	Period 01	<End>	Tonnes	Mapped	300 000.00	370 000.00	
KET_3_DST_1	Period 01	<End>	Tonnes	Mapped	1 000 000.00	1 015 000.00	

Фиг. 7. Планово минимално и максимално количество руда за двата корпуса едро трошене за периода

### Транспортна работа и задаване техническите параметри на изкопно-товарната и транспортна техника

Activity Scheduler има вграден модул Haulage, който регламентира изграждането и поддръжката на транспортната мрежа и валидация на взаимодействието ѝ с минния план. Транспортната мрежа се изгражда по съществуващите пътища, като между всеки две кръстовища трябва да има една единствена линия (Фиг. 8). Основният принцип за изчертаване е посоката на отсечките да бъде от планирания забой към разтоварните пунктове (Workbook, 2023).



Фиг. 8. Разположение на кръстовищата, разтоварните пунктове и транспортна мрежа на рудник „Елаците“

При планиране работата на добивната техника е необходимо да бъдат отчетени техническите параметри при работа в рудника. Тъй като работната среда не е еднородна и има фактори, влияещи върху производителността, се въвеждат технологичните характеристики, които са отчетени за предходен период. При дефинирането и планирането на минната техника, в софтуера са обособени три комбинации на автосамосвали, които се използват за превозване на минната маса – спрямо капацитета им и спрямо горивото на наличните багери (Фиг. 9). Част от основните параметри на автосамосвалите, необходими за изчисление на цикъла на работа, са капацитет на коша, скорост според наклона на трасето, дължина на трасето и др. При въвеждане на допълнителни данни, относно автосамосвалите, има

възможност за генериране на доклади за цялостната работа на всеки един от тях.

Equipment List		Attributes for Belaz-HH_Deisel big				
Type	Name	Name	Description	Type	Units	Value
Hauler	Belaz_130t	_TUse	Use trolley asset where available	TEXT	TRUE/FALSE	FALSE
Hauler	Belaz-HH_Deisel big	_FBSWait	Fuel burn during wait time	FLOAT	GMPLPH	63.9
Hauler	Belaz-HH_Deisel small	_FBSpot	Fuel burn during spot time	FLOAT	GMPLPH	70.95
Hauler	Belaz-HH_Deisel small	_FBDump	Fuel burn during dump time	FLOAT	GMPLPH	105.84
Hauler	Belaz-HH_Electric	_GrossWeight	Unloaded weight of equipment	FLOAT	Kg	107300

Фиг. 9. Технически параметри на автосамосвалите

За изкопно-товарните машини се задават параметри като ефективност, ефикасност, време за един цикъл и капацитет на кофата (Фиг. 10). Тези данни са базирани на технологичната производителност на багерите, за период от 1 година. Обобщаването и генерализирането за такъв период е с цел да се отчете разликата в работата при различните климатични условия, както и различните работни условия - забои, видове скали и др.

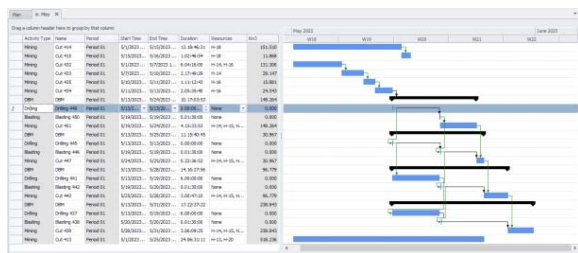
Equipment List		Attributes for HH_Deisel big				
Type	Name	Name	Description	Type	Units	Value
Hauler	Belaz_130t	_Availability	Availability for piece of equipment	FLOAT	Percent	95
Hauler	Belaz-HH_Deisel big	_CycLoader	Cycle time of loader	FLOAT	Minutes	26
Hauler	Belaz-HH_Deisel small	_Description	Description of equipment	TEXT	Text	Heads 16
Hauler	Belaz-HH_Deisel small	_LoadRate	Loading Rate	FLOAT	Kg per hour	969000
Loader	HH_Deisel big	_Payload	Capacity for piece of equipment	FLOAT	Kg	40650
Loader	HH_Deisel small	_Utilization	Utilization for piece of equipment	FLOAT	Percent	43

Фиг. 10. Технически параметри на изкопно-товарната техника

### Създаване на линеен график (Gantt chart)

Основната задача на ръководството на всяка компания е да взема решения относно политиките и да предприема действия, които ще доведат до желаното състояние. В условия на непрекъснато нарастваща нужда от метали, решенията и действията трябва да се основават не само на внимателно доказана информация, но и на пълното оценяване на важността на въздействието от нея (Clark, 1922). Линейният график (диаграмата на Гант), поради своето пространственото представяне, както на количеството време, така и количеството работа, която трябва да бъде извършена през това време, има забележителен принос при ръководене и управление на минни проекти.

За целите на този доклад планирането и проектирането е направено за период от 1 месец. Гант диаграмата съдържа два основни раздела - табличен и графичен (Фиг. 11), като в детайли е показана информацията, нужна за ръководството да контролира процесите.



Фиг. 11. Линеен график на минно-добивните дейности на рудник „Елаците“ за период от 1 месец

Детайлната таблица представя минните дейности и свързаната с тях информация – начало и край, продължителност за изпълнение и др. За визуалното изобразяване на продължителността и последователността им таблицата е обвързана с графика.

### Заклучение

Тъй като рудникът е сложна система с множество критерии, функционални ограничения и липса на пълна априорна информация за средата, планирането на минно-добивните дейности се превръща в предизвикателство. Затова работата със стандартните софтуери, използвани за минно проектиране, вече отстъпва място на модерни и специализирани продукти, ориентирани към конкретната сфера. Те предоставят на минния инженер голяма гъвкавост за изработване на множество варианти, които от своя страна да покажат различни крайни състояния на рудника при зададен кратък период. Минно-геоложката информация е на разположение в една платформа, което намалява възможността от грешки и рационализира планирането. MinePlan Activity Scheduler обединява модул за проектиране, обвързване на планираните дейности времево и създаване на реалистичен график на дейностите в рудник „Елаците“. Това помага за максимално използване на времето и ресурсите в отдел „Минно планиране“, като позволява на инженерите да се съсредоточат върху проекти с по-значимо въздействие, които често изискват решаване на проблеми и творческо мислене – нещо, което дори най-добрият софтуер за планиране и проектиране няма да може да замени.

### Благодарности

Авторите на доклада изразяват своята благодарност към всички колеги от техническите служби. Тяхната отдаденост към работата, любопитство за нови иновативни методи и подходи, спомогна за написването на разработката.

### Литература

Clark, H. W. (1922). The Gantt Chart: A Working Tool of Management. New York: Ronald Press.

Osanloo, M., & Rahmanpour, M. (2017). Optimizing short-term production plan using a portfolio optimization model. REM-International engineering journal.

Smith, M. L. (1998). Optimizing short-term production schedules in surface mining: Integrating mine modeling software with AMPL/CPLEX. International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment, 149-155.

Upadhyay, S. P., & Hooman, A.-N. (2016). Short-term Production Planning in Open Pit Mines. Edmonton: Mining Optimization Laboratory (MOL).

Workbook, H. M. (2023). Activity-Based Scheduling with Activity Scheduler.

# STRESSES AROUND A HORIZONTAL MINE GALLERY PASSING THROUGH A CRACKED ROCK MASS

Rayna Vucheva, Violeta Trifonova – Genova

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: rayna.vucheva @mgu. violeta.trifonova@yahoo.com

**ABSTRACT:** A horizontal mine gallery is driven into a rock mass with cracks. The cracks in it are located in horizontal parallel and closely spaced planes. The field between them is linear and isotropic. The cross-section of the gallery is an ellipse. The stresses at points around the gallery are determined by an approximate method. According to it, the rock mass is presented as an equivalent uniform transversely isotropic field. The expressions for the constants of this field include the normal and tangential stiffness of the cracks. The specified class of problems is solved with the complex potential theory. The expressions for the stresses are in a cylindrical coordinate system.

The constants for a real cracked rock mass are defined. The values of the tangential normal stresses at points of the ellipse are obtained. These stresses are compared to the stresses in an equivalent uniform isotropic rock mass.

**Key words:** complex potential theory, mine gallery, cracked rock mass

## НАПРЕЖЕНИЯ ОКОЛО ХОРИЗОНТАЛНА МИННА ГАЛЕРИЯ, ПРЕМИНАВАЩА ПРЕЗ НАПУКАН СКАЛЕН МАСИВ

Райна Вучева, Виолета Трифонова-Генова

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

**РЕЗЮМЕ:** Хоризонтална минна галерия е прокарана в скален масив с пукнатини. Пукнатините в него са разположени в хоризонтални успоредни и близко разположени равнини. Средата между тях е линейна и изотропна. Напречното сечение на галерията е елипса. Напреженията в точки около галерията се определят с приблизителен метод. Според него, скалният масив се представя като еквивалентна еднородна трансверзално изотропна среда. В изразите за константите на тази среда участват нормалната и тангенциална коравини на пукнатините. Указаният клас задачи се решава с комплексната потенциална теория. Изразите за напреженията са в цилиндрична координатна система.

За реален напукал скален масив са определени константите. Получени са стойностите на тангенциалните нормални напрежения в точки от елипсата. Тези напрежения са сравнени с напреженията в еквивалентен еднороден изотропен масив.

**Ключови думи:** комплексната потенциална теория, минна галерия, напукал скален масив.

## Introduction

The distribution of stresses around the opening of a horizontal mine gallery is used in the assessment of rock strength. For this, it is necessary to match the stresses in the rock mass around the hole with the strength of the soil. When studying the stressed state of the rock massif around the gallery, a model is used that takes into account the continuity and uniformity of the environment. Analytical methods for this type of tasks have been developed in literature (Mushkhelishvili, 1953; Minchev, 1960).

But in nature, the properties of rocks are diverse, due to many natural factors. Among them, the existence of cracks has the greatest weight. If the rock massif has one or several cracks, the boundary element method is suitable (Crouch et al., 1983). It uses tension and compression boundary contact elements. For the case of a rock mass with very closely spaced cracks, this method is irrational. Therefore, an approximate approach is described in (Godman, 1976).

The aim of the present work is to investigate the influence of cracks in this array on the stresses around a horizontal mine gallery with an elliptical cross-section using this approach.

At a great depth  $H$ , a mining gallery has been driven. It has an elliptical cross-section with dimensions  $2a$  and  $2b$ . The Cartesian coordinate system has its origin at the center of the hole (fig.1).

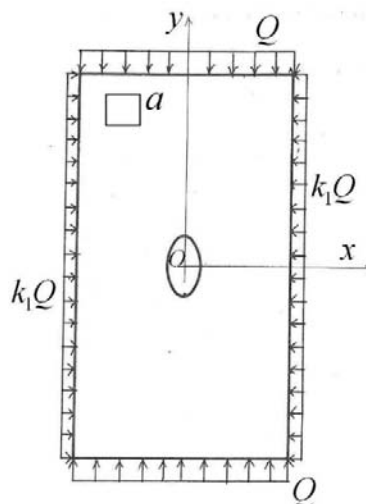


Fig. 1. Calculation scheme

The hole's influence extends into a rectangular area with dimensions  $12a$  and  $12b$ . The vertical and horizontal load ( $Q$  and  $k_1Q$ ) along the contour of the area (fig. 1) is equal to the

stress components at a point of undisturbed rock array. The analytical expressions for these components are:

$$\sigma_y^o = \gamma y = Q; \sigma_x^o = k_1 \sigma_y^o = k_1 Q; \sigma_z^o = k_2 \sigma_y^o. \quad (1)$$

where

- $k_1$  and  $k_2$  are the coefficients of lateral resistance;
- $\gamma$  is the volumetric weight;
- $y$  is the vertical coordinate of the point (fig.1).

The directions of these components are given in Figure 2.

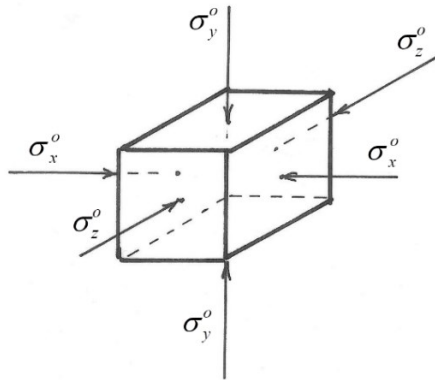


Fig. 2. Stresses in an undisturbed rock mass

For a rock mass with a horizontal plane of isotropy, the coefficients of (1) have the form:

$$k_1 = \frac{a_{13}a_{23} - a_{12}a_{33}}{a_{11}a_{33} - a_{13}^2}; \quad k_2 = \frac{a_{12}a_{13} - a_{11}a_{23}}{a_{11}a_{33} - a_{13}^2}. \quad (2)$$

The deformation coefficients in these expressions are expressed by the medium constants:

$$a_{11} = \frac{1}{E_{xx}}; \quad a_{33} = \frac{1}{E_{zz}}; \quad a_{12} = -\frac{\nu_{xy}}{E_{yy}}; \\ a_{13} = -\frac{\nu_{xz}}{E_{zz}}; \quad a_{23} = -\frac{\nu_{zy}}{E_{yy}}, \quad (3)$$

where

-  $E_x, E_y, E_z$  are Young's modulus in the direction of the coordinate axes  $x, y$  and  $z$ ;

-  $\nu_{xy}, \nu_{yx}, \nu_{xz}, \nu_{zx}$  are Poisson's ratio characterising the transverse deformations in tension and compression in the direction of the coordinate axes.

If the medium is perfectly isotropic for the coefficients of lateral resistance  $k_1$  and  $k_2$ , A. N. Dinnik's formula is obtained:

$$k = \frac{\nu}{1 - \nu}. \quad (4)$$

## 2. Additional stresses

These tensions are caused by the presence of the gallery. They are determined by means of two unknown complex functions. The sum of these functions is a function of stresses  $F(x,y)$ . It satisfies the quasi-bi harmonic equation (Muskhelichvili, 1953; Minchev, 1960):

$$b_{55} \frac{\partial^4 F}{\partial x^4} + b_{17} \frac{\partial^4 F}{\partial x^2 \partial y^2} + b_{11} \frac{\partial^4 F}{\partial y^4} = 0, \quad (5)$$

where  $b_{17} = (2b_{13} + b_{55})$ .

Here,  $x$  and  $y$  are coordinates of a point midway around the hole. The coefficients in this equation are expressed by Young's modulus, Poisson's ratios in the plane of isotropy and in a direction perpendicular to it, and have the following form:

$$b_{11} = \frac{1 - \nu_{yx}\nu_{xy}}{E_y}; \quad b_{33} = \frac{1 - \nu_{xz}^2}{E_x}; \\ b_{13} = -\frac{\nu_{yx} + \nu_{yx}\nu_{xy}}{E_y}; \quad b_{55} = \frac{1}{G_{xy}}. \quad (6)$$

The stress function depends on variables in which the roots of the characteristic equation are involved (Ivanova, 2022; Minchev, 1960; Trifonova-Genova, 2019):

$$b_{11}s^4 + (2b_{13} + b_{55})b_{17}s^2 + b_{33} = 0, \quad (7)$$

For the problem described above, the roots of equation (7) are:

$$s_1 = \beta_1 i; \quad s_2 = \beta_2 i; \quad s_3 = -\beta_1 i; \quad s_4 = -\beta_2 i. \quad (8)$$

Here,  $i$  is an imaginary unit.

## 3. Total stresses at a point in the rock mass

Stresses in a transversely isotropic medium are defined as the sum of the principal stresses existing before the mining gallery was driven and the additional stresses caused by the presence of the hole. Then it goes from Cartesian to polar coordinates. In addition, the real part is separated from general complex expressions.

Here, we will focus on the stresses along the hole contour, which have the form (Minchev, 1960):

$$\sigma_\theta = \frac{\sigma_y^o}{e_1} (e_2 + e_3); \quad (9) \\ \sigma_z = -\left[ \frac{e_4 \sigma_\theta}{a_{33} e_1} + k_2 \sigma_y^o \right],$$

where

$$\begin{aligned}
 e_1 &= \sin^2 \vartheta + m^2 \cos^2 \vartheta; \quad m = \frac{b}{a}; \quad \operatorname{tg} \vartheta = \frac{b}{a} \operatorname{tg} \theta; \\
 e_2 &= k_1 \sin^2 \vartheta + m^2 \cos^2 \vartheta; \quad e_3 = \frac{BC - AD}{C^2 + D^2}; \\
 e_4 &= a_{13} \sin^2 \vartheta + a_{23} m^2 \cos^2 \vartheta; \\
 A &= A_1 A_4 + A_2 A_5 + A_3 A_6; \\
 A_4 &= \sin^3 \vartheta \cos \vartheta; \quad A_5 = \sin \vartheta \cos^3 \vartheta; \\
 A_6 &= \sin^2 \vartheta \cos^2 \vartheta; \quad \beta_3 = \beta_1 + \beta_2; \quad \beta_4 = \beta_1 \beta_2; \\
 A_1 &= k_1 m \beta_3 - \beta_4; \quad A_3 = k_1 m (2 + \beta_4); \\
 A_2 &= \beta_3 m^3 - (1 + 2\beta_4) m^3 - k_1 m^4; \\
 A_7 &= \sin^4 \vartheta; \quad A_8 = \cos^4 \vartheta; \\
 B &= B_3 A_6 + B_1 A_7 + B_2 A_8; \\
 B_1 &= k_1 m \beta_3 - \beta_4; \quad B_2 = k_1 m^4 - \beta_3 m^3; \\
 B_3 &= k_1 m^2 (2 + \beta_4) - (1 + 2\beta_4) m^2; \\
 C &= \sin^2 \vartheta - \beta_4 m^2 \cos^2 \vartheta; \quad D = \beta_4 m \sin \vartheta \cos \vartheta.
 \end{aligned}$$

If the rock mass is isotropic, the following formulae are used for the stresses:

$$\begin{aligned}
 \sigma_\theta &= \frac{\sigma_y^o}{e_1} (e_2 + e_3), \\
 \sigma_z &= -\nu \left( \sigma_\theta + \frac{1}{1-\nu} \right),
 \end{aligned} \tag{10}$$

where

$$\begin{aligned}
 e_1 &= \sin^2 \vartheta + m^2 \cos^2 \vartheta; \quad m = \frac{b}{a}; \\
 e_2 &= k_1 \sin^2 \vartheta + m^2 \cos^2 \vartheta; \quad e_3 = \frac{BC - AD}{C^2 + D^2}; \\
 A &= A_1 A_4 + A_2 A_5 + A_3 A_6; \\
 A_4 &= \sin^3 \vartheta \cos \vartheta; \quad A_5 = \sin \vartheta \cos^3 \vartheta; \\
 A_6 &= \sin^2 \vartheta \cos^2 \vartheta; \quad A_1 = 2k_1 - 1; \quad A_3 = 3k_1; \\
 A_2 &= -1 - k_1; \quad B = B_3 A_6 + B_1 A_7 + B_2 A_8; \\
 B_1 &= 2k_1 - 1; \quad B_2 = k_1 - 2\beta_3; \quad B_3 = 3k_1 - 3; \\
 C &= \sin^2 \vartheta - \cos^2 \vartheta; \quad D = 2 \sin \vartheta \cos \vartheta; \\
 C^2 + D^2 &= 1.
 \end{aligned}$$

#### 4. Characteristics of a rock mass

The cracks in the rock mass (Figure 1 with square a) are located in horizontal planes. The distance between them is  $s_o$ . The material between the planes is isotropic (Fig.3).

Cracks have normal  $K_n$  and tangential  $K_s$  stiffness. These parameters are involved in the characteristics of the cracked array (Godman, 1976; Vucheva et al., 2023):

$$E_y = \frac{E}{1 + E/(s_o K_n)}; \quad G_{xy} = \frac{G}{1 + G/(s_o K_s)};$$

$$\begin{aligned}
 E_x = E_z = E; \quad \nu_{xy} = \nu_{xz} = \nu; \quad \nu_{yx} = \frac{E_y}{E_x} \nu_{xy}; \\
 \nu_{zx} = \frac{E_z}{E_x} \nu_{xz} = \nu.
 \end{aligned} \tag{11}$$

Here,  $E$  is the Young's modulus,  $\nu$  is Poisson's ratio, and  $G$  is the shear modulus in an isotropic field.

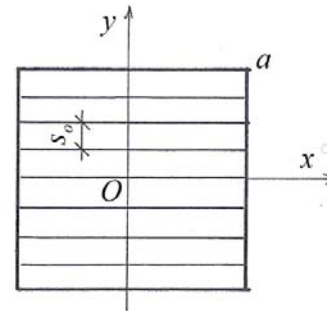


Fig. 3. Cracked rock mass

The constants from (11) are substituted into (3). The dependences are obtained for the deformation coefficients:

$$\begin{aligned}
 a_{11} &= \frac{1}{E}; \quad a_{33} = \frac{1}{E}; \quad a_{12} = -\frac{\nu}{E_y}; \quad a_{13} = -\frac{\nu}{E}; \\
 a_{23} &= -\frac{\nu}{E_y}.
 \end{aligned} \tag{12}$$

These coefficients are involved in expressions (1) for the stresses before the excavation of the gallery.

#### 5. Numerical example

In a rock mass, the cracks are located in horizontal planes. The distance between them is  $s_o = 2m$ , and the normal and tangential stiffness are  $K_n = \infty$  and  $K_s = 0,2315 \cdot 10^3 \text{ MPa} / m$ . Between the planes, the medium is isotropic with the following characteristics:  $E = 10^4 \text{ MPa}$ ,  $\nu = 0,2$ ; and  $G = 0,4167 \cdot 10^4 \text{ MPa}$ . The mining gallery driven through the rock mass has an elliptical cross-section. The mining gallery has a width of  $2b$  and a height of  $2a$ . The ratio of the major to the minor axis of the section is 1.5.

According to (11), the characteristics of the cracked medium are determined. The coefficients in (6) are determined and equation (7) is solved. The tangential normal stresses along the contour of the hole were calculated for two types of rock mass. Equations (5) are used in the cracked rock mass, and equations (8) are used in the isotropic rock mass. These stresses are referred to the stress  $Q$  in the undisturbed medium. Due to the symmetry about the two axes, calculations are made for first square points. The results are listed in Table 1.

The normal tangential stress diagrams are given in Figure 3. The solid line indicates the normal tangential stresses in the



cracked rock mass, and the dotted line those in the isotropic rock mass.

Table 1. Normal tangential stresses in two types of rocks

n	[°]	$\sigma_\theta / Q$	$\sigma_{\theta,o} / Q$
1	0	-4.891	-2.75
2	15	-1.512	-2.546
3	30	-0.338	-2.000
4	45	-0.236	-1.249
5	60	-0.386	-0.500
6	75	-0.598	+0.049
7	90	-0.836	+0.25

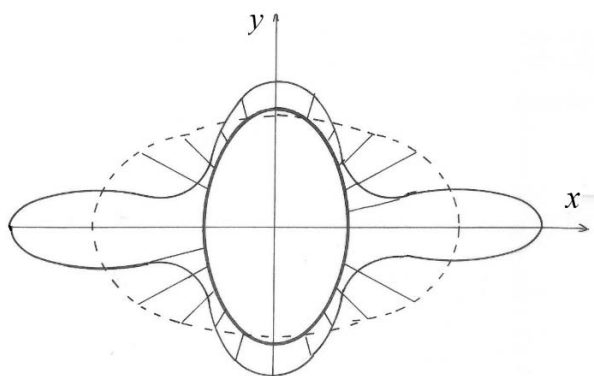


Fig. 4. Diagrams of the normal tangential stresses in the two media

The following conclusions can be drawn from Table 1 and Figure 4:

In both environments, the maximum values of the tangential normal stresses occur at points on the hole contour through which the horizontal axis passes. Stresses in the cracked rock mass are 1.8 times greater than the corresponding stresses in the isotropic mass.

Along the vertical axis, the stresses in the two media are of different signs. The stresses in the cracked rock mass are negative, and in the isotropic rock mass - positive. The values of stresses in the studied environment are 5.8 times smaller than the same along axis  $x$ .

### 6. Key findings

From the results obtained above, it can be concluded that the stresses in a cracked medium are greater than the same in an isotropic medium. Therefore, it is necessary to take into account this non-uniformity and apply the environment model proposed in the work.

The method described in the article is easy to implement and does not require the application of any software packages, but the use of popular calculation tools, such as spreadsheets (Harvey, 2018).

### Conclusion

The described method can be applied to a rock mass having cracks located in inclined parallel planes. The opening of the gallery may be of a different shape.

The analytical relationships in this work can be used by engineers when investigating stresses around underground facilities.

When cracks are not located in horizontal planes, Goodman et al. (Goodman et al., 1963) proposed a contact element in the numerical finite element method (Whintely, 2017; Jing et al., 2002). The element has a rectangular shape with four nodes. The stresses in it are proportional to the deformations. The stiffness matrix included in the ANSYS software package (Reference manual, 2020) is proposed for it.

### References

ANSYS. Academie (2020). RI Reference manual. [www.ansys.com](http://www.ansys.com)

Godman, R. E. (1976). *Method of geological engineering*. –St. Paul: West. 484p. ISBN-10: 0829900667.

Goodman, R. E., Taylor, R. L., Broke T. L. (1963). A model for the mechanics of jointed rock. *Proc. ASCE*. Vol. 94, No. EM3, 1963.

Harvey, G. (2018). *Microsoft Excel 2019 for Dummies*. Alex Soft, 496p. (in Bulgarian)

Ivanova, M. (2022). Stresses in transversely isotropic rock mass around a circular opening. *Annual of the University of Mining and Geology “St. Iv, Rilski” –Sofia*. Volume 65, Section: Mining and Mineral Processing, 26-29.

Jing, L., Hudson, J. A. (2002). Numerical method in rock mechanics. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 39, 409-427.

Minchev, I. (1960). Vurhu napregnatoto sostoyanie na zemnia masiv v okolnostta na izработка s elipti'no naprechno sechenie. *sp. Minno delo I metalurgiya*, kn.10, 31-35.

Muskhelishvili, N. I. (1953). *Some basic problems of the mathematical Theory of Elasticity*. - Gromingen: Nordhoff, 706 p.

Vucheva, R., Trifonova-Genova, V. (2023). Stress around a circular horizontal opening driven in cracked rock mass. *Annual of the University of Mining and geology “St. Iv, Rilski” –Sofia*. Volume 66, Section: Mechanization, Electrification and Automation, 195-198.

Whintely, J. (2017). *Finite element method*. Springer, 232p. ISBN 978-3-319-49970-3

# INFLUENCE OF HIGH HARMONICS ON THE OPERATION OF DIGITAL RELAY PROTECTIONS

*Kiril Dzhustrov*

*University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: justrov@mgu.bg*

**ABSTRACT.** The effect of higher harmonics on the operation of digital relay protections has been investigated. Real-measured currents and voltages with harmonic components were modelled under laboratory conditions, and the characteristics of their protective functions were studied. The time error under different measurement modes of two inverse characteristics was evaluated.

**Key words:** higher harmonics, protective functions.

## ВЛИЯНИЕ НА ВИСШИТЕ ХАРМОНИЦИ ПРИ РАБОТАТА НА ЦИФРОВИ РЕЛЕЙНИ ЗАЩИТИ

*Кирил Джустров*

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

**РЕЗЮМЕ.** Изследвано е влиянието на висшите хармоници при работата на цифрови релейни защиты. В лабораторни условия са моделирани реално заснети токове и напрежения с хармонични съставни, като са изследвани характеристиките на защитните им функции. Оценена е времевата грешка при различни режими на измерване на две инверсни характеристики.

**Ключови думи:** висши хармоници, защитни функции.

### Въведение

Основна характеристика на релейните защиты е зависимостта между закъснението на защитата и стойността на въздействащата величина или мястото на повредата. За някои релейни защиты закъснението не зависи от стойността на въздействащата величина. Тези защитите работят с еднакво закъснение при всички повреди в зоната им и при всички стойности на въздействащата величина в областта на работването. Това са защитите с независима характеристика. Защити със зависимости от тока характеристики се използват в разпределителните мрежи от началото на миналия век. При тях закъснението зависи от стойността на въздействащата величина. Намерили са приложение както при защита на електропроводи, така и за защита на трансформатори и електродвигатели.

При работа на електрическите съоръжения често има наличие на големи стойности на висшите хармоници в напрежението и тока. Когато товарът се състои от мощни вентилни преобразуватели или електродъгови пещи, коефициентът на несинусоидалност THD може да достигне значителни стойности. В изследвания на Chobanov et al. (2013), коефициентът на несинусоидалност THD в напрежението е от порядъка на 4,2÷4,4%, докато в тока THD достига до 27,4% (Стоилов и др., 2015) на страна средно напрежение и дори до 63% (Chobanov et al., 2013) на страна ниско напрежение. Лаков (2024) също изследва наличието на висши хармоници в мрежи ниско напрежение, захранващи постояннокови преобразуватели. Отчетени са коефициенти на несинусоидалност, достигащи до 5,10% в напрежението. В публикация на S. Taheri et al. (2012) се разглежда проблемът на загряването на силовите трансформатори при наличие на висши хармоници. Често товарът на трансформаторите е с ток, съдържащ висши хармоници, което води до увеличаване на загубите в тях и намаляване на остатъчния им ресурс. Тъй като през трансформатора

протичат токове с хармонични съставни, той може да бъде подложен на допълнителни загуби и нагряване, водещо до намаляване на експлоатационния му срок. Jalil Yaghoobi et al. (2012) разглеждат остатъчния ресурс на трансформаторите, като се отчита спектъра на хармоничните съставни в тока, електрическите характеристики, топлинното поведение и др. В изследване на Матанов и Сидеров (2004) е моделирано влиянието на параметрите на електрооборудованата система върху генерираните хармоници на ток и напрежение от мощни токоизправители. Съставеният от тях модел позволява да се установи степента на претоварване на основни елементи на електрооборудованата система (кондензаторни батерии, силови трансформатори и др.) въз основа на наличието на висши хармоници на тока и напрежението. В публикация на Zabchev A. & R. Alexandrov (2023) е направен аналитичен анализ на висшите хармоници в напрежението и тока на магнитен сепаратор. Дадена е методика за определяне на хармоничния състав при наличие на полупроводникови преобразуватели в мрежата.

Проучвания на Al-Musawi et al. (2015) представят практически тест на хармоничното влияние върху електромеханични и микропроцесорни релета. В тези проучвания е установено, че влиянието на THD е незначително върху защитните релета, докато влиянието на чист сигнал с по-висока от основната честота има значителен ефект върху функцията на защитните релета. В изследване на Wannous & Toman (2018) е представено сравнението между алгоритъма на защитното реле при необичайни условия и математически модел в програмната среда Matlab Simulink, базиран на моделирани хармоници с високи стойности.

Jedrzejczak et al. (2014) изследват влиянието на висшите хармоници върху работата на цифровите релейни защиты. Доказват, че при различни стойности на THD се получава значително увеличение на времето на изключване.

От друга страна, висшите хармоници в тока увеличават грешката на токовите трансформатори. В свое изследване Indra Nisja (2018) установява, че когато THD на първичната страна се увеличи до 32%, грешката на вторичния ток на токовите трансформатори е 20,58%. Това би довело до неправилно действие на релейните защиты.

Релейните защиты имат възможност да измерват както ефективни стойности (режим RMS), така и стойността на величините по фундаменталния (1-ви) хармоник (режим DFT). От гледна точка на визуализацията на контролираните величини това би довело до грешка, което не е съществен проблем. Но когато защитните функции са настроени в режим на измерване DFT обратно зависимите характеристики ще се отличават от референтните стойности.

### Експериментални изследвания

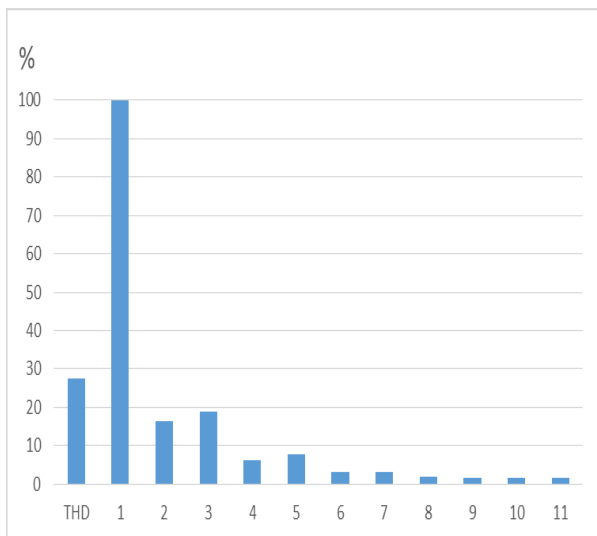
С цел изследване на работата на релейните защиты в лабораторни условия са моделирани токови сигнали с хармонични съставни. Лабораторните тестове са извършени с автоматично тестово устройство ARTES 440.

В таблица 1 са дадени нивата на хармониците за THD=27.6%, регистрирани в Стоилов и др. (2015), а на Фиг. 1 – вида на сигнала с TDH=27,6% и вида на фундаменталната съставна. Моделираният сигнал е опростен, като са взети под внимание само хармоници до номер 11-ти.

Таблица 1. Стойности на висшите хармоници при изследването

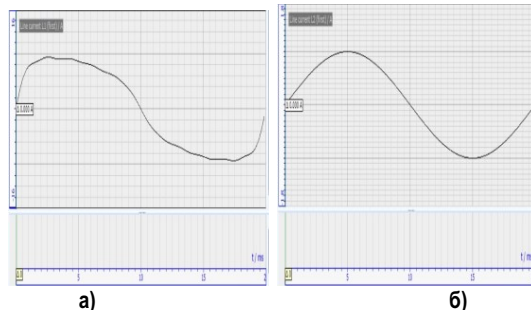
№	THD	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
%	27,6	100	16,52	18,9	6,28	7,85	3,19	3,1	1,9	1,75	1,55	1,5

На Фиг. 1 е показан спектърът на висшите хармоници, с които е моделирано изследването.



Фиг. 1. Спектър на моделираните хармоници

На Фиг. 2а) е показана кривата на токовия сигнал, с която са направени експериментите, а на Фиг. 2б) е представен вида на първи хармоник.



Фиг. 2. Форми на вълната на тока по време на еднофазна повреда: а) TDH=27,6%; б) основен 1-ви хармоник

При наличие на висши хармоници, несинусоидалният ток е:

$$I_{rms} = \sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} I_{h,rms}^2} \tag{1}$$

където  $I_{h,rms}$  е текущата хармонична амплитуда от порядък  $h$  (т.е.  $h$ -тия хармоник) и  $I_{rms}$  е текущата амплитуда на нормалната честота и хармоничните компоненти:

Общият коефициент на несинусоидалност THD е съгласно израза:

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} I_{h,rms}^2}}{I_{rms}} \tag{2}$$

При THD=27,6% в режим на измерване DFT на защитната функция, токът ще бъде 1,0375 пъти по-малък от действителната ефективна стойност.

Когато в релейната защита се въвеждат обратнoзависими от времето характеристики, това ще доведе до по-малки отношения  $I/I >$  в израза за зависимостта, даваща връзка между тока и времето.

$$t = \left[ \frac{A}{\left(\frac{I}{I >}\right)^B - 1} + L \right] \cdot T_p \tag{3}$$

Където  $A$ ,  $B$  и  $L$  са коефициенти, зависещи от избраната обратно зависима от времето характеристика, а  $T_p$  е времеви множител, определящ семейството характеристики.

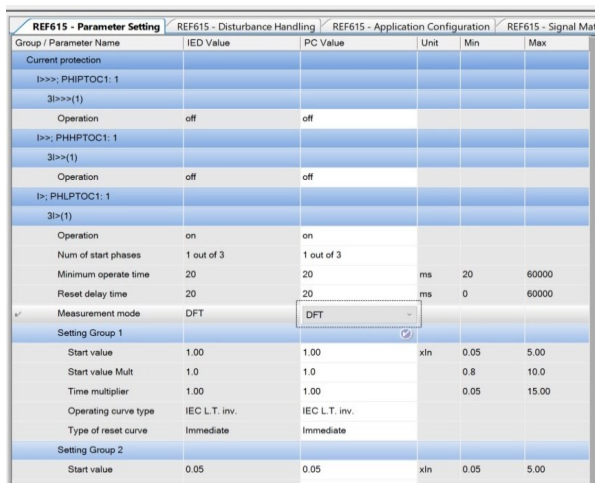
В таблица 2 са дадени коефициентите за два вида характеристики, систематизирани в Джустров (2013), които са изследвани. Изследването е направено с времеви множител  $T_p=1$ .

Таблица 2. Коефициенти за различни характеристики

Семейство токови характеристики	Стандарт	A	B	L
Normal inverse (NIT)	IEC	0,14	0,02	0
Long-time inverse (LIT)	IEC	120,0	1,0	0

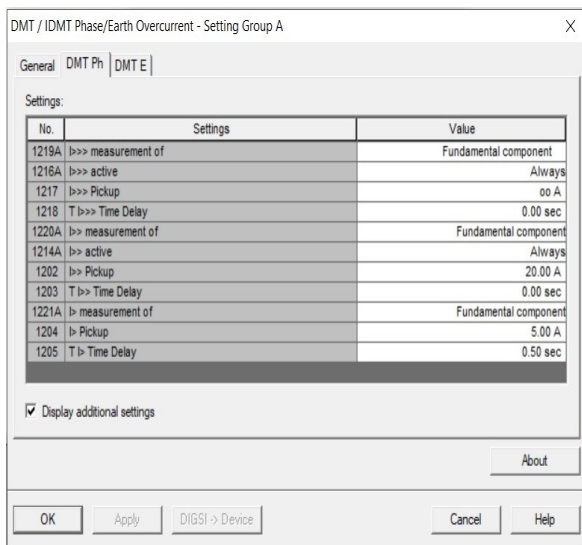
При настройката на релейните защиты на ABB, по подразбиране защитните функции ще работят по

фундаменталната компонента DFT (Фиг. 3). Когато измерваната величина има хармонични съставни е необходимо да бъде променена стойността на „Measurement mode“ в RMS.



Фиг. 3. Екран за настройка при ABB с PSM600

При настройка на защитите на Siemens, също по подразбиране е заложено измерване по „Fundamental component“, но, за да бъде променено, е необходимо да бъде поставена отметка на „Display additional settings“ (Фиг. 4).



Фиг. 4. Екрани за настройка при Siemens с DIGSI 4

В таблица 3 са дадени резултатите от изследванията при различни отношения I/I> за изследвано защитно реле REF615 на ABB. Въведено е отношение на токовите трансформатори 100:1 и по Фиг. 3 са променени „Measurement mode“ в режим DFT или RMS и „Operating curve type“ в IEC NIT или IEC L.T. inv.

С автоматичното тестово товарно устройство са задавани различни отношения на ефективната стойност на токов сигнал (Фиг. 2а) към зададената в защитата стойност (Start value) на I>. Изследвани са два вида характеристики – NIT и LIT по стандарта IEC с времеви множител Tr=1. В същата таблица са дадени референтните времена за двата вида характеристики, определени по формула (3).

Таблица 3. Резултати от изследването

I/I>	Measurement		NIT, Tr=1			LIT, Tr=1		
	RMS, A	DFT, A	Ref. t, s	RMS, s	DFT, s	Ref. t, s	RMS, s	DFT, s
1.25	125.0	120.5	<b>31.300</b>	31.878	38.248	<b>480.000</b>	483.792	590.797
1.3	130.0	125.3	<b>26.611</b>	27.008	31.447	<b>400.000</b>	401.661	476.373
1.5	150.0	144.6	<b>17.194</b>	17.395	19.113	<b>240.000</b>	240.950	270.520
2	200.0	192.8	<b>10.029</b>	10.073	10.639	<b>120.000</b>	120.212	129.554
3	300.0	289.2	<b>6.302</b>	6.331	6.550	<b>60.000</b>	60.061	63.491
4	400.0	385.5	<b>4.980</b>	4.995	5.134	<b>40.000</b>	40.014	42.048

От таблица 3 е видно, че при настройка на защитните релета в RMS режим, времената им ще съответстват (със съответна минимална грешка) на референтните стойности, но при режим на измерване в релето DFT, т.е. по първи хармоник, имат голяма времева грешка. Това ще доведе до по-бавно изключване на релейната защита при наличие на висши хармоници, което пък от своя страна ще създаде предпоставки за по-продължително по време недопустимо претоварване на електрическите съоръжения.

Относителната грешка за времето на действие ще бъде:

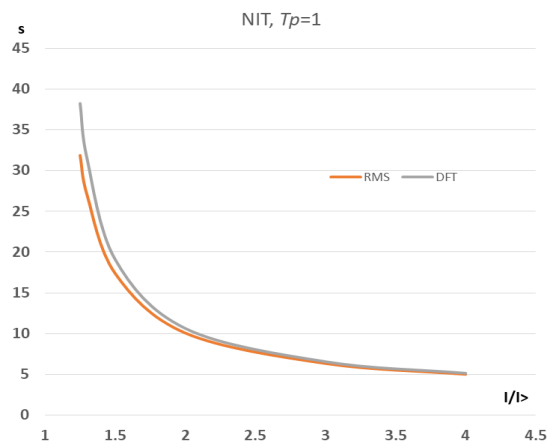
$$\delta_t = \frac{t - t_{ref}}{t_{ref}} \cdot 100, \% \tag{4}$$

където:

t е действителното време на действие на защитата;

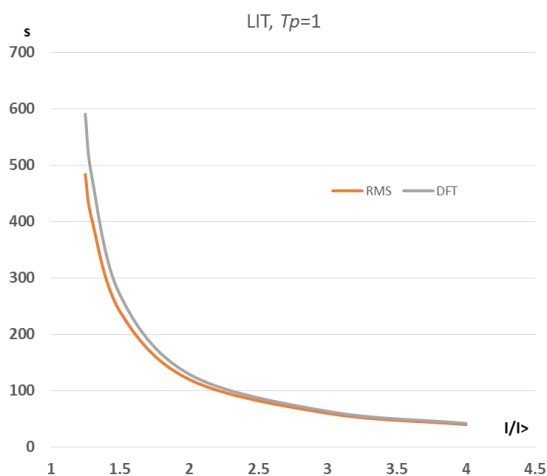
t<sub>ref</sub> – референтното време на действие, съгласно формула (3).

При обратно зависимите характеристики основното предимство е, че при късо съединение близо до източника изключват по-бързо. Но когато се защитават двигатели, характеристиките се избират така, че да има ефективна защита и при претоварване. Замествайки в (4) за характеристика LIT при претоварване с 25% се получава относителна грешка от 22,12%, което е абсолютна грешка от около 107s. В много случаи, това е недопустимо за двигателите и трансформаторите.



Фиг. 5. Характеристики RMS и DFT при Normal inverse (NIT)

На Фиг. 5 са представени графично резултатите от изследването при характеристика NIT с Tr=1, а на Фиг. 6 – за характеристика LIT с Tr=1.



Фиг. 6. Характеристики RMS и DFT при Long-time inverse (LIT)

## Заклучение

Направените изследвания водят да следните изводи:

1. Относителната грешката по време при задействие на защитите не надхвърля 1% в режим на измерване RMS, което е и декларирано от производителя. При работа в режим DFT, времевата грешка достига до 19,98% при характеристика NIT (при  $I/I_p=1,25$ ) и до 22,12% при характеристика LIT (при  $I/I_p=1,25$ ).

2. При въвеждане на защитни функции, обратно зависими от времето, е необходимо измерването за защитната функция на релетата да бъдат в режим RMS за да се отчете влиянието и на висшите хармоници.

3. Препоръчително е въвеждане на обратно зависими характеристики и при отпадане на релетата. Това би осигурило създаване на по-добър топлинен модел в изчислителната логика на защитата.

## Литература

- Al-Musawi, L.; Wayne, A.; Yu, W.; Al-Mutawaly, N. (2015). The effects of waveform distortion on power protection relays. In Proceedings of the International Protection Testing Symposium, Feldkirch, Austria, 13–14 October 2015.
- Chobanov St, Drenkov, M., Menteshhev, M. (2013). Experimental study and analysis of high harmonics in the lv mine network with frequency-controlled motors, ANNUAL of the University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, Vol. 56, Part III,

- Indra Nisja. (2018), Performance of current transformer operate under harmonic condition and their effects on transformer differential protection, MATEC Web of Conferences 159, 02075, <https://doi.org/10.1051/mateconf/201815902075>
- Jedrzejczak, J., Anders, G.J., Sekalski, Pr. (2014). Analysis of the Effects of Harmonics on a Digital Protective Relay Operation, Conference: Innovation for Secure and Efficient Transmission GridsAt: Brussels, Belgium
- Jalil Yaghoobi et al. (2012). Impact of high-frequency harmonics (0–9 kHz) generated by grid-connected inverters on distribution transformers, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Volume 122, November 2020, 106177, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106177>
- Kinan Wannous and Petr Toman, (2018). Evaluation of Harmonics Impact on Digital Relays, *Energies* 2018, 11(4), 893; <https://doi.org/10.3390/en11040893>
- Shamsodin Taheri et al. (2012). Modeling and simulation of transformer loading capability and hot spot temperature under harmonic conditions, *Electric Power Systems Research*, Volume 86, May 2012, Pages 68-75, <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2011.12.005>
- Wang, F., Bollen, M. (2015), Classification of Component Switching Transients in the Viewpoint of Protective Relays. Ph.D. Thesis, Chalmers University of Technology, Gцteborg, Sweden.
- Zabchev, A., Alexandrov, R. (2023). Current control of the electromagnetic separator, *SEPRM journal*, Sofia, Bulgaria, p. 76-81.
- Джустров, К. (2013), Съвременни цифрови релейни защити, избор, настройка, експлоатация, София: Изд. къща “Св. Иван Рилски”, 116 стр.
- Лаков, Н. (2024). Висши хармоници в мрежи ниско напрежение, захранващи постоянно токови преобразуватели, Енергиен форум 2024.
- Матанов, Н., Сидеров, С. (2004) Моделиране на влиянието на параметрите на електроснабдителната система върху генерираните хармоници на ток и напрежение от мощни токоизправители, *Год. на Минно-геоложки университет “Св. Иван Рилски”*, том 47, свитък III, Механизация, електрификация и автоматизация на мините, София, стр. 99-104.
- Стоилов, Ив., Джустров, К. (2010). Висши хармоници в мрежи с мощни вентилни преобразуватели. *Год. на МГУ “Св. Иван Рилски”*, том 53, София, стр. 121-124.
- Стоилов, Ив., Джустров, К., Николов Т. (2015). Изследване хармоничния състав на напрежението и тока при работа на електродъгови стоманодобивни пещи, *Сп. Енергиен форум*, бр. 15/16, 2015г., стр. 65-69.





За една друга позиция на т.А по хоризонталната права векторът  $\overline{OB}$  представлява импеданса  $\dot{Z}$  ( $\overline{OB} \Rightarrow \dot{Z}$ ), а векторът  $\overline{OB'}$  представя тока  $\dot{I}$  ( $\overline{OB'} \Rightarrow \dot{I}$ ) тъй като аргументът на  $\dot{Z}$  е равен на аргумента на  $\dot{I}$  в тази точка.

Ще докажем, че когато точка В се движи по правата АВ, точка В' се движи по полуокръжност с диаметър ОА'.

$$\dot{Z} \cdot \dot{I} = \dot{U} \text{ - закон на ОМ} \quad (4)$$

$$\dot{Z} \cdot \dot{I} = U = \text{const} \quad (5)$$

$$OA \cdot OA' = OB \cdot OB' \quad (6)$$

$$\frac{OA}{OB} = \frac{OB'}{OA'} \quad (7)$$

следователно триъгълниците ОАВ и ОВ'А' са подобни ( $\triangle OAB \sim \triangle OB'A'$ ) тъй като имат общ ъгъл  $\angle AOB$ .

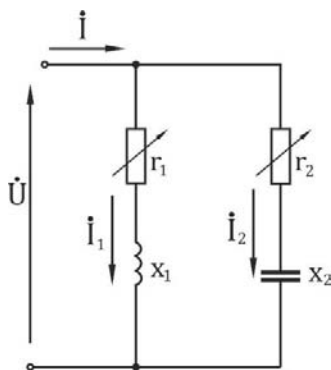
След като двата триъгълника са подобни това означава, че  $\angle OB'A'$  е прав и точка В' се движи по окръжност. Този факт е основата на графичния "метод на кръговите диаграми". Геометричната му интерпретация е кръговото преобразование „инверсия“.

Изводът от анализа на фиг.1а е, че когато ходографът на импеданса е права линия, ходографът на тока е окръжност.

### Добавяне на Г-С верига

На фиг. 2 е показана Г-С верига, успоредно свързана към веригата от фиг.1. Ако двата елемента  $r_2$  и  $x_2$  са с установена стойност, токът през тях  $\dot{I}_2$  не се променя. На фиг. 2а е показано как се построява ГМТ  $\dot{I}_1$ .

$$8) \dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2$$

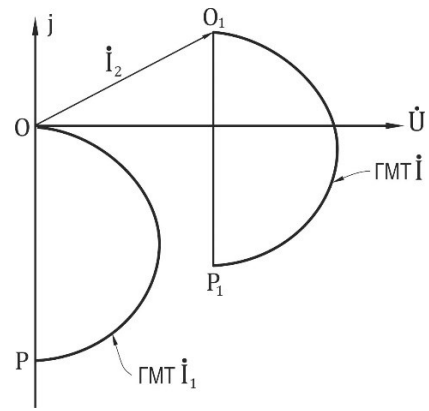


Фиг. 2. Успоредно свързани г-L и г-С вериги

ГМТ  $\dot{I}_1$  е полуокръжност  $\widehat{OP}$ .

Тази полуокръжност се транслира (успоредно премества) до полуокръжност  $\widehat{O_1P_1}$ , която представлява ГМТ  $\dot{I}$  (кръговата диаграма на тока  $\dot{I}$ ). Посоката и разстоянието на трансляцията се определят от тока  $\dot{I}_2$ .

$$\dot{I}_1 = \text{var} \quad \dot{I}_2 = \text{const}$$

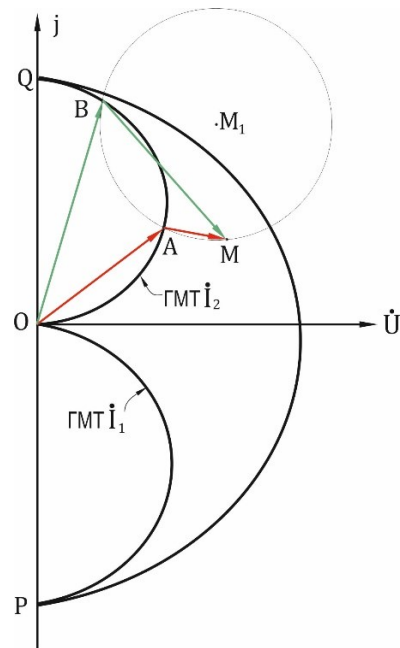


Фиг. 2а. Транслация на ГМТ  $\dot{I}_1$

### Успоредно свързани вериги с две управляеми съпротивления $r_1$ и $r_2$

Нека съпротивленията  $r_1$  и  $r_2$  от фиг. 2 се променят от 0 до  $\infty$ , при  $x_1 = x_2$ .

ГМТ  $\dot{I}_1$  е полуокръжност  $\widehat{OP}$  (фиг. 2b). Максималната стойност на този ток при  $r_1 = 0$  е  $I_{1m} = \frac{U}{x_1}$  и се изобразява с отсечка ОР. Този ток е чисто индуктивен.



Фиг. 2b.  $x_1 = x_2 \quad r_1(0 \div \infty) \quad r_2(0 \div \infty)$

ГМТ  $\dot{I}_2$  е полуокръжност  $\widehat{OQ}$ . Максималната стойност на този чисто капацитивен ток при  $r_2 = 0$  е  $I_{2m} = \frac{U}{x_2}$  и се изобразява с отсечка ОQ.

ГМТ на общия ток  $\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2$  при два регулируеми елемента не е линия, а повърхност.

На фиг. 2b тази повърхност е затворена между полуокръжностите  $\widehat{OP}$ ,  $\widehat{OQ}$  и  $\widehat{PQ}$ .

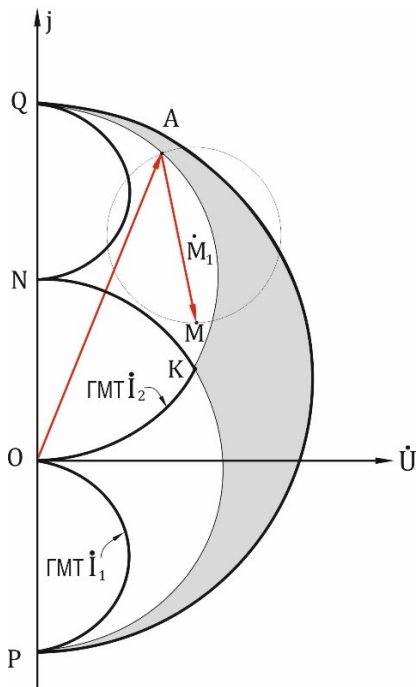
Всички възможни стойности на тока  $\dot{I}$  са точки от комплексната равнина, които са вътре в тази фигура. Фигурата се получава чрез трансляция на полуокръжност

$\widehat{OP}$  така, че точка  $O$  се движи по направляващата дъга  $\widehat{OQ}$  докато съвпадне с точка  $Q$ . Дъгата  $\widehat{OP}$  описва (маркира) цялата повърхност на фигурата. Сега избираме произволна точка  $M$  вътре във фигурата. Векторът  $\overline{OM}$  е вектор на общия ток  $\dot{I}$ . Искаме да определим двата тока  $\dot{I}_1$  и  $\dot{I}_2$ , чиято сума дава тока  $\dot{I}$ .

Построението е просто. Вертикално нагоре от точка  $M$  намираме точка  $M_1$ , така че  $MM_1 = \frac{OP}{2}$ . С център  $M_1$  описваме окръжност с радиус  $MM_1$ , която пресича полуокръжност  $\widehat{OQ}$  в две точки  $A$  и  $B$ . Двете точки дават две решения поради една особеност на фигурата – при движението си дъгата  $\widehat{OP}$  преминава по два пъти през всяка произволно избрана точка  $M$ .

$\overline{OA}$  е вектор на тока  $\dot{I}_2$ .  
 $\overline{AM}$  е вектор на тока  $\dot{I}_1$ .  
 $\overline{OM} = \overline{OA} + \overline{AM}$  или  $\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2$ .  
 $\overline{OB}$  е вектор на тока  $\dot{I}_2''$ .  
 $\overline{BM}$  е вектор на тока  $\dot{I}_1''$ .  
 $\overline{OM} = \overline{OB} + \overline{BM}$  или  $\dot{I} = \dot{I}_1'' + \dot{I}_2''$ .

На фиг. 2с, разглежданата повърхност е построена при  $X_1 > X_2$  т.е.  $I_{1m} < I_{2m}$   
 $OP < OQ$ .



Фиг. 2с.  $x_1 > x_2$   $I_{1m} < I_{2m}$

Полуокръжност  $\widehat{OP}$  е ГМТ на  $\dot{I}_1$ , а полуокръжност  $\widehat{OQ}$  е ГМТ на  $\dot{I}_2$ .

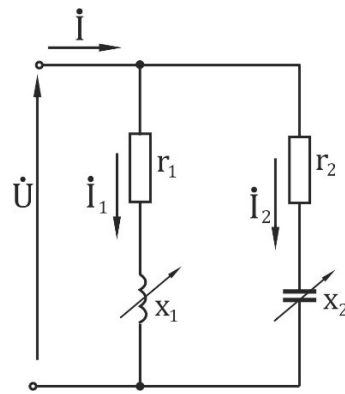
Дъгата  $\widehat{OP}$  се движи чрез трансляция по направляващата окръжност  $\widehat{OQ}$  и описва начертаната фигура, ограничена от дъгите  $\widehat{OP}$ ,  $\widehat{OK}$ ,  $\widehat{KN}$ ,  $\widehat{NQ}$  и  $\widehat{QP}$ .

В тази фигура има една област (двойна повърхност), в която задачата има две решения както на фиг. 2b. Тази област е ограничена от дъгите  $\widehat{PK}$ ,  $\widehat{KQ}$  и  $\widehat{QP}$ .

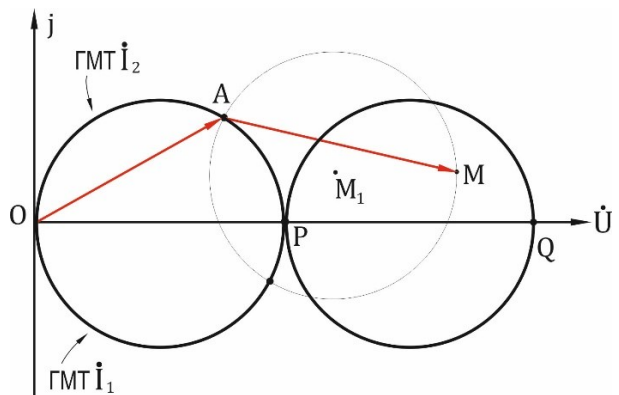
На фиг. 2с точка  $M$  е извън двойната повърхност и дава едно решение. По същия начин намираме т.  $M_1$  вертикално нагоре, така че  $MM_1 = \frac{OP}{2}$ . Начертаваме окръжност с център  $M_1$  и радиус  $MM_1$ , която пресича полуокръжност  $\widehat{OQ}$  в точка  $A$ . Вектор  $\overline{OA}$  е токът  $\dot{I}_2$ , а вектор  $\overline{AM}$  е токът  $\dot{I}_1$ .

### Успоредно свързвани вериги с две управляеми съпротивления $x_1$ и $x_2$

На фиг. 3 реактивните съпротивления  $x_1$  и  $x_2$  се променят независимо една от друго от  $0$  до  $\infty$ . На фиг. 3а долната полуокръжност  $\widehat{OP}$  е ГМТ на индуктивния ток  $\dot{I}_1$ , а горната полуокръжност  $\widehat{OQ}$  е ГМТ на капацитивния ток  $\dot{I}_2$ .



Фиг. 3.  $x_1(0 \div \infty)$   $x_2(0 \div \infty)$



Фиг. 3а.  $r_1 = r_2$   $x_1(0 \div \infty)$   $x_2(0 \div \infty)$

ГМТ на общия ток  $\dot{I}$  е повърхността, затворена в двете окръжности на фиг. 3а. Тази фигура се описва от дъгата  $\widehat{OP}$  на ГМТ  $\dot{I}_1$  при трансляция докато съвпадне с долната полуокръжност  $\widehat{PQ}$ , така че точка  $O$  се движи по направляващата полуокръжност  $\widehat{OAP}$ .

Всички възможни стойности на тока  $\dot{I}$  са точките, затворени в двете окръжности с диаметри  $OP$  и  $PQ$ . Нека чрез точка  $M$  да зададем тока  $\dot{I}$ . Искаме да определим токовете  $\dot{I}_1$  и  $\dot{I}_2$ , така че:

$$\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2.$$

Задачата има само едно решение. То се намира по следния начин. Наляво от точка М в хоризонтална посока определяме точка  $M_1$ , така че  $MM_1 = \frac{OP}{2}$ .

С център  $M_1$  и радиус  $M_1M$  начертаваме окръжност, която пресича ГМТ  $\dot{I}_2$  в точка А.

$\overline{OA}$  е вектор на тока  $\dot{I}_2$  (капацитивен).

$\overline{AM}$  е вектор на тока  $\dot{I}_1$  (индуктивен).

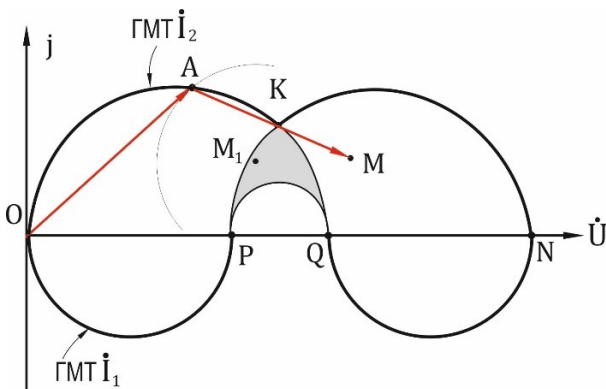
$\overline{OM} = \overline{OA} + \overline{AM}$  или  $\dot{i} = \dot{i}_2 + \dot{i}_1$ .

На фиг. 3b е начертана ГМТ  $\dot{I}$ , при  $r_1 > r_2$  т.е.  $I_{1m}(OP)$  е по-малко от  $I_{2m}(OQ)$ . Фигурата се получава чрез трансляция на ГМТ  $\dot{I}_1$  докато съвпадне с полуокръжност  $\widehat{QN}$  така че точка О да се движи по направляващата полуокръжност  $\widehat{OKQ}$  (ГМТ  $\dot{I}_2$ ). Фигурата е затворена от полуокръжностите  $\widehat{OP}$ ,  $\widehat{PQ}$  и  $\widehat{QN}$  отдолу и от дъгите  $\widehat{OK}$  и  $\widehat{KN}$  отгоре.

Маркираният участък PQQ е двойна повърхност. Когато общия ток (точка М) попада в нея, задачата за определяне на  $\dot{I}_1$  и  $\dot{I}_2$  има две решения. Когато точка М е извън нея, задачата има едно решение. Както на фиг. 3a за точка М е точка на общия ток  $\dot{I}$ , точка  $M_1$  е на разстояние  $M_1M = \frac{OP}{2}$  от М. Окръжността с център  $M_1$  и радиус  $M_1M$  пресича дъгата  $\widehat{OK}$  (ГМТ  $\dot{I}_2$ ) в точка А.

$\overline{OA}$  е вектор на тока  $\dot{I}_2$  (капацитивен)

$\overline{AM}$  е вектор на тока  $\dot{I}_1$  (индуктивен).



Фиг. 3b.  $r_1 > r_2$   $I_{1m} < I_{2m}$

### Успоредно свързани вериги с две управляеми съпротивления $r_1$ и $x_2$

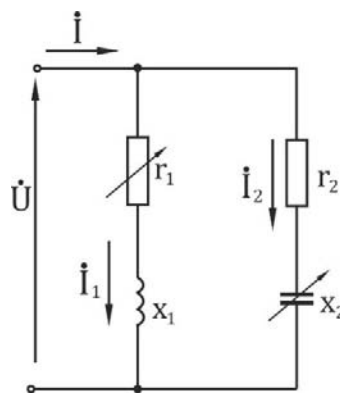
На фиг. 4 активното съпротивление  $r_1$  и реактивното съпротивление  $x_2$  се променят независимо едно от друго от 0 до  $\infty$ . На фиг. 4a е показана графиката на тока  $\dot{I}$  при условие, че:

$$r_2 = x_1 \text{ и } I_{1m} = I_{2m}$$

Полуокръжност  $\widehat{OP}$  е ГМТ  $\dot{I}_1$ .

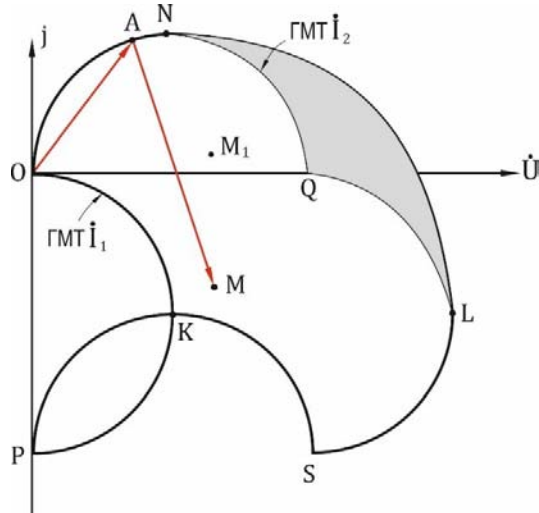
Полуокръжност  $\widehat{OQ}$  е ГМТ  $\dot{I}_2$ .

$OP = OQ$ .



Фиг. 4.  $r_1(0 \div \infty)$   $x_2(0 \div \infty)$

Фигурата се получава при трансляция на полуокръжност  $\widehat{OP}$ , така че точка О винаги да лежи върху направляващата полуокръжност  $\widehat{OQ}$ . Повърхността е затворена между дъгите  $\widehat{OP}$ ,  $\widehat{PS}$ ,  $\widehat{ON}$ ,  $\widehat{SL}$  и  $\widehat{NL}$ .  $\widehat{NL}$  е част от окръжност с център К.



Фиг. 4a.  $r_2 = x_1$   $I_{1m} = I_{2m}$

Маркираният участък между точките N, Q и L е „двойна повърхност“. Ако точка М попадне в нея, задачата има две решения. По вече описания начин при дадена точка М намираме  $M_1$  вертикално нагоре на разстояние  $MM_1 = \frac{OP}{2}$ . Окръжността с център  $M_1$  и радиус  $M_1M$  пресича полуокръжността OQ в точка А.

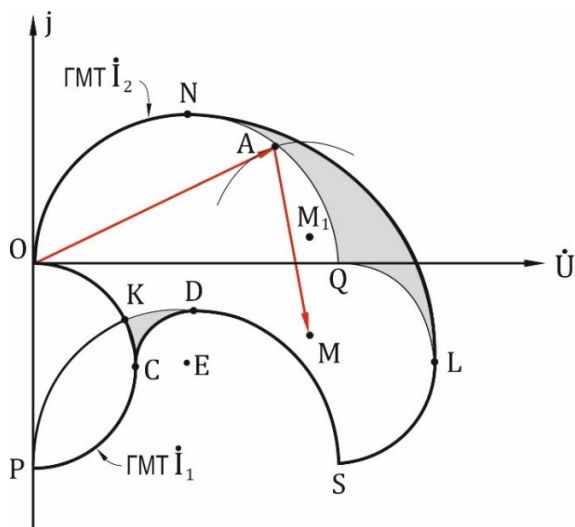
$\overline{OA}$  е вектор на тока  $\dot{I}_2$ .

$\overline{AM}$  е вектор на тока  $\dot{I}_1$ .

$\overline{OM}$  е вектор на тока  $\dot{I}$ .

На фиг. 4b е показан случай, при който  $r_1 > r_2$  и съответно  $I_{1m} < I_{2m}$ .

OP отговаря на  $I_{1m}$ , а OQ на  $I_{2m}$ . Тук полуокръжност  $\widehat{OP}$  се премества чрез трансляция докато достигне полуокръжност  $\widehat{QS}$ , така че точка О винаги лежи върху направляващата полуокръжност  $\widehat{OQ}$ . При това движение дъгата  $\widehat{OP}$  описва повърхността на фиг. 4b.



Фиг. 4b.  $r_1 > x_2$   $I_{1m} < I_{2m}$

Тази повърхност е оградена от дъгите  $\widehat{OK}$ ,  $\widehat{KP}$ ,  $\widehat{PC}$ ,  $\widehat{CD}$ ,  $\widehat{DS}$ ,  $\widehat{SL}$ ,  $\widehat{LN}$  и  $\widehat{NO}$ .

Дъгите  $\widehat{CD}$  и  $\widehat{LN}$  имат общ център в точка E.

Маркираните области на „двойна повърхност“ са две – между точките C, D и K и N, L и Q. В тези области задачата има две решения. Точка M е точка на общия ток  $\dot{I}$ ,  $M_1M = \frac{OP}{2}$ .

Окръжността с център  $M_1$  и радиус  $M_1M$  пресича полуокръжност  $\widehat{OQ}$  в точка A.

$\overline{OA}$  е вектор на тока  $\dot{I}_2$ .

$\overline{AM}$  е вектор на тока  $\dot{I}_1$ .

### Заклучение

Успоредно свързаните вериги може да са само г-L, само г-C или смесени. Освен за разгледаните тук две успоредно свързани вериги, методът на успоредно пренасяне на полуокръжност може да се използва и за три, и четири успоредно свързани вериги.

Поставената задача, при зададен общ ток да се определят токовете в отделните клонове, е решена графично.

### Литература

- Смит, Ф. (1976). *Кръговые диаграмы в радиозлектронике*. М., Связь.
- Воронов, Р. А. (1941). *Кръговые диаграмы. Известия Томского института имени Кирова*. 59, II.
- Хорст Фрай. (1981). *Въведение в теорията на кръговите диаграми*. Техника, С.



# STRESSES IN A TRANSVERSAL ISOTROPIC ROCK MASS DUE TO DRIVING A MINE GALLERY

*Malina Ivanova*

*University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: malina\_vatz@abv.bg*

**ABSTRACT:** A horizontal underground mining gallery is excavated in a transversely isotropic rock mass. It has a plane of isotropy inclined to the axis of production. The gallery has a circular cross-section. The stresses around the opening are determined by the complex potential theory. The behaviour of the rock mass is described by a partial differential equation as a function of the stresses. It depends on the roots of the characteristic equation. The coefficients in the characteristic equation are defined for a real rock mass. Its roots are the complex numbers. They are involved in the stress function variables and in the expressions for the stresses at points of the opening.

**Key words:** mine gallery, transversally isotropic rock mass, complex potential theory.

## НАПРЕЖЕНИЯ В ТРАНСВЕРЗАЛНО-ИЗОТРОПЕН СКАЛЕН МАСИВ ВСЛЕДСТВИЕ ПРОКАРВАНЕ НА МИННА ГАЛЕРИЯ

*Малина Иванова*

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

**РЕЗЮМЕ:** Хоризонтална подземна минна галерия е прокопана в трансверзално-изотропен скален масив. Той притежава наклонена спрямо оста на изработката равнина на изотропия. Галерията има кръгово напречно сечение. Напреженията около отвора се определят с комплексна потенциална теория. Поведението на скалния масив се описва с частно диференциално уравнение на функция на напреженията. Тя зависи от корените на характеристичното уравнение. За реален скален масив са определени коефициентите в характеристичното уравнение. Неговите корени са комплексните числа. Те участват в променливите на функция на напрежението и в изразите за напреженията в точки от отвора.

**Ключови думи:** минна галерия, трансверзално изотропен скален масив, комплексна потенциална теория.

## Introduction

Determining the stresses in the rock mass as a result of driving a mine gallery or tunnel is a major task faced by engineers. Its solution depends on the manifestation of anisotropy and the shape of the cross section of the gallery. The behaviour of the rock mass is described by the partial quasi-biharmonic equation (Muskhelishvili, 1953; Savin, 1961; Lu et al., 2024). The solution of this equation depends on the roots of the characteristic equation.

Here, a rock mass having a plane of isotropy will be investigated. According to its location relative to the axis of the gallery, three types of development are known. The first type includes studies in which the plane of isotropy is horizontal or vertical (Vucheva et al., 2023). The second type covers developments in which the plane is inclined to the horizontal axis of the cross section (Tonnon et al., 2003; Vucheva et al., 2020; Trifonova-Genova et al., 2022). The third type includes studies in which the plane is inclined to the axis of the work.

The aim of the present work is to compile the differential equation of the field for the third case. Furthermore, the steps to solve its characteristic equation are to be described.

## Methods

### 1. Formulation of the problem

A mining gallery with a circular cross-section passes through a transversely isotropic rock mass. Its plane of isotropy is inclined to the axis of gallery.

### 2. Differential equation

The behaviour of the rock mass is described by several systems of equations. These are the condition of continuity of strains, the generalised Hooke's law giving the relationship between stresses and strains, the expressions for the stresses expressed by the function  $F(x,z)$ . After uncomplicated mathematical operations, we arrive at a partial differential equation of the sixth order:

$$B_1 \frac{\partial^6 F}{\partial x^6} + B_2 \frac{\partial^6 F}{\partial x^4 \partial z^2} + B_3 \frac{\partial^6 F}{\partial x^2 \partial z^4} + B_4 \frac{\partial^6 F}{\partial z^6} = 0, \quad (1)$$

where

$$B_1 = c_{22}c_{66}, \quad B_2 = c_{22}c_{55} + c_{10}c_{66} - c_{11}^2, \\ B_3 = c_{10}c_{55} + c_{33}c_{66} - 2c_{11}; \quad B_4 = c_{33}c_{55} - c_{35}^2; \\ c_{10} = (2c_{23} + c_{44}); \quad c_{11} = (c_{25} + c_{46}); \\ c_{ij} = a_{ij} - \frac{a_{i1}a_{j1}}{a_{11}}; \quad i, j = 2, 3, \dots, 6.$$

Here,  $x$  and  $z$  are coordinates of a point from the environment around the opening. The coefficients  $a_{ij}$  in these formulae can be seen in the paper by Trifonova-Genova (2019). They are expressed by Young's modulus, Poisson's ratios in the plane of isotropy and in a direction perpendicular to it, and by the slope of the plane of isotropy  $\varphi$  (Fig.1).

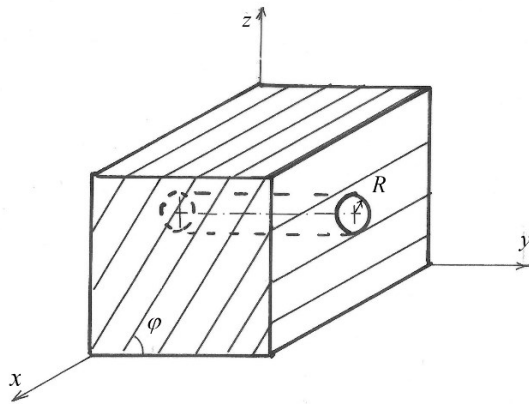


Fig.1. A horizontal circular gallery in a rock mass with an inclined plane of isotropy

### 3. Characteristic equation

The general integral of equation (1) depends on the roots of the characteristic equation:

$$B_1 s^6 + B_2 s^4 + B_3 s^2 + B_4 = 0. \quad (2)$$

This equation is an incomplete equation of the sixth degree. After putting  $u = s^2$ , equation (2) takes the form:

$$B_1 u^3 + B_2 u^2 + B_3 u + B_4 = 0. \quad (3)$$

### 4. Roots of a characteristic equation

Equation (3) is divided by  $B_1$  and the resulting equation is:

$$u^3 + A_1 u^2 + A_2 u + A_3 = 0, \quad (4)$$

where

$$A_1 = \frac{B_2}{B_1}; \quad A_2 = \frac{B_3}{B_1}; \quad A_3 = \frac{B_4}{B_1}.$$

Cardano's formula (Cardano's method) is applied to determine the roots of equation (4):

$$u_1 = S + T - \frac{1}{3} A_1; \quad (5)$$

$$u_2 = \frac{1}{2}(S + T) - \frac{1}{3} A_1 + \frac{1}{2} i\sqrt{3}(S - T);$$

$$u_3 = \frac{1}{2}(S + T) - \frac{1}{3} A_1 - \frac{1}{2} i\sqrt{3}(S - T),$$

where

$$Q = \frac{3a_2 - a_1^2}{9}; \quad R = \frac{9a_1 a_2 - 27a_3 - 2a_1^3}{9};$$

$$S = \sqrt[3]{R + \sqrt{Q^3 + R^2}}; \quad T = \sqrt[3]{R - \sqrt{Q^3 + R^2}};$$

$$D = Q^3 + R^2.$$

If  $D$  is positive, then one root of the characteristic equation (4) is real, and both are complex conjugate numbers. The roots are obtained from the expression:

$$s_j = \sqrt{u_j}, \quad j = 1, 2, 3. \quad (6)$$

The remaining three roots are complex conjugated.

The resulting roots are involved in the expressions for the stress functions and their derivatives. Through them, the displacements and stresses in points of the opening of the mine gallery are expressed, which are the subject of further work.

### 5. Numerical example

The rock mass has a plane of isotropy tilted at an angle  $\varphi = 70^\circ$  (Fig.1). For it, Young's modulus and Poisson's ratio are  $E_1 = 14,5 \cdot 10^3 \text{ N/m}^2$  and  $\mu_1 = 0,105$ . In a direction perpendicular to this plane, the parameters are  $E_2 = 41,5 \cdot 10^3 \text{ N/m}^2$  and  $\mu_2 = 0,3$ . The shear modulus in the same direction is  $G_2 = 8,24 \cdot 10^3 \text{ N/m}^2$ .

The strain coefficients are given in (Vucheva et al., 2020). The coefficients from (1) and the coefficients in the characteristic equation (4) were calculated. The latter are given in the following table:

Table 1. Coefficients in equation (4)

$A_1$	$A_2$	$A_3$
2.4436	2.1704	0.5974

From (5),  $D$  is calculated:  $D = 0,002224$ . The roots of equation (4) and the roots of equation (2) are given in Table 2.

Table 2. Roots of equations (4) and (2)

$u_1$	$u_2$	$u_3$
-0.4961	-0.6653+0.50605i	-0.6653-0.50605i
$s_1$	$s_2$	$s_3$
0.7043i	0,2938+0.8612i	0.2938-0.8612i
$\bar{s}_1$	$\bar{s}_2$	$\bar{s}_3$
-0.7043i	-0,2938+0.8612i	-0.2938-0.8612i

### 6. Key findings

The approach described in the work for solving the characteristic equation is applied to a rock mass with an isotropy plane inclined to the axis of the gallery.

### Conclusion

The resulting roots are involved in the complex variables of the stress function  $F(x, z)$  from (1). It is a sum of two analytical functions of complex variables. Through them, the stresses surrounding crafting are expressed. Their expressions are a sum of a real and an imaginary part. The expressions for the stresses are obtained from this real part. When the stresses

along the contour of the mining gallery are small, the engineer guarantees the stability of the gallery.

## References

- Cardano's method. (2024, mars 19). <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/9781118635360.app1>
- Lu, A., Wang, H., Zhang, L. (2024). *Complex variable function in the Mechanical Analysis of Tunnels*. Springer, 400p. ISBN\_10 981971690X.
- Muskhelishvili, N. I. (1953). *Some basic problems of the mathematical Theory of Elasticity*. - Gromingen: Nordhoft, 706 p.
- Savin, G. N., (1961). *Stress concentration around holes*, London; Pergamon.
- Tonnon, F., Amadei, B. (2003). Stresses in anisotropic rock masses: an engineering perspective building on geological knowledge. *Int. J. Rock Mech. Min Sci.*, Vol. 40, 1099-120.
- Trifonova-Genova, V. (2019). Stress and strain state in transversally isotropic rock – 1. - *Processing in Annual University Scientific Conference, National Warming University “V. Levski”*, 27-28 June, 403-411.
- Trifonova-Genova, V., Tonkova, G. (2022). Stress around circular opening excavation in layered and sliding rock mass, *Annual of the University of Mining and geology “St. Iv, Rilski” -Sofia*, Volume 65, Section II: Mining and Mineral Processing, 46-50.
- Vucheva, R., Ivanova, M. (2020). On the determination of function for stress in transversally isotropic rock mass with elliptic opening. - *Journal of Mining and Geological Sciences*, 63, Part II: Mining Technology and Mineral Processing, 122-124.
- Vucheva, R., Trifonova-Genova, V. (2023). Stress around a circular horizontal opening driven in cracked rock mass, *Annual of the University of Mining and geology “St. Iv, Rilski” -Sofia*, Volume 66, Section: Mechanization, Electrification and Automation, 195-198.

## STRUCTURE OF AN ELECTRIC DRIVE SYSTEM WITH A SWITCHED RELUCTANCE MOTOR

Georgi Kostov, Romeo Alexandrov

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, Sofia, E-mail: georgi\_kostov@mgu.bg, romeo.alexandrov@mgu.bg

**ABSTRACT.** Electric drives systems are the main consumers of electrical energy in industry. Most often, the annual energy costs of an electric drive are many times greater than its purchase value. Improving their technical and economic indicators is a priority worldwide. Electric drives built on the basis of switched reluctance motors (SRM) offer a working perspective. Due to their advantages, they are increasingly used in electric drives in the mining industry. The report examines the different switched reluctance motor (SRM) electric propulsion structures. The motor works together with a power electronic commutator - a converter that sequentially switches the phase windings in synchronism with the angular position of the rotor. Therefore, regardless of the control method, rotor position information is absolutely necessary. Basically, electric drives are divided into two main types (depending on whether information about the position of the rotor is received from a sensor or not): sensor and sensorless. The sensor carries a potential risk of damage and limits speed regulation due to the limitation of its resolving power. Because of this, research has recently been moving towards sensorless control. The report lists the requirements for the used converters and their classification, and analyses the operating modes of some of the most widely used converters. The main purpose of the report is to make a comparative analysis of the structures and functional blocks of electric drive with SRM in view of their potential for use in different applications, to which certain requirements are made.

**Keywords:** switched reluctance motor (SRM), electric drive, control, converter

### СТРУКТУРА НА СИСТЕМА НА ЕЛЕКТРОЗАДВИЖВАНЕ С ПРЕВКЛЮЧВАЕМ РЕАКТИВЕН ДВИГАТЕЛ

Георги Костов, Ромео Александров

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

**РЕЗЮМЕ.** Електрозадвиганията се явяват основен потребител на електрическа енергия в промишлеността. Най-често годишните енергийни разходи на едно електрозадвигане са многократно по-големи от неговата цена. Подобряването на технико-икономическите им показатели е приоритет в световен мащаб. Перспектива за работа предлагат електрозадвиганията, изградени на базата на превключваеми реактивни двигатели (ПРД). Поради техните предимства те ще намират все по-широко приложение в електрозадвиганията в минната индустрия. В доклада са разгледани различни структури на електрозадвигане с превключваем реактивен двигател (ПРД). Двигателят работи съвместно със силов електронен комутатор - преобразувател, който последователно превключва фазните намотки в синхронизъм с ъгловото положение на ротора. По тази причина, независимо от метода за управление, информацията за позицията на ротора е абсолютно необходима. Основно електрозадвиганията се разделят на два основни типа (в зависимост от това дали се получава информация за позицията на ротора от сензор или не) – сензорни и безсензорни. Сензорът носи потенциален риск от повреда и ограничава регулирането на скоростта поради ограничението на разделителната му способност. Поради това в последно време изследванията се насочват към безсензорното управление. В доклада са изброени изискванията към използваните преобразуватели, направена е класификация и са анализирани състоянията на работа на едни от най-използваните преобразуватели. Основна цел на доклада е да се направи сравнителен анализ на структурите и функционалните блокове на електрозадвигане с ПРД с оглед на тяхната перспективност за различни приложения, към които се предявяват определени изисквания.

**Ключови думи:** превключваем реактивен двигател (ПРД), електрозадвигане, управление, преобразувател

### Въведение

Електрозадвиганията се явяват основен потребител на електрическа енергия в промишлеността. Най-често годишните енергийни разходи на едно електрозадвигане са многократно по-големи от неговата цена. Подобряването на технико-икономическите им показатели е приоритет в световен мащаб. Перспектива за изследвания предлагат електрозадвиганията, изградени на базата на превключваеми реактивни двигатели (ПРД). Спецификата на електромеханичното преобразуване на енергията в електрозадвиганията с ПРД и особеностите на работа в промишлени условия, обуславят нарастващия брой изследвания по света. През 1972 г. Burnice Bedford получава два патента, свързани с управлението на ПРД. Според Fleadh Electronics преди 1976 г. са публикувани 67 патента и над 1775 до 1999 г., а статиите свързани с ПРД са 11 преди 1976 г. и над 1847 до 1999 г. Търсят се начини не само за оптимизация на параметрите на електродвигателите с оглед на тяхното приложение, но също така се предлагат находчиви решения за подобряване на тяхното управление. Въпреки напредъкът в разработването на електрозадвиганията с ПРД в световен мащаб те заемат сравнително малък дял от всички въведени в експлоатация регулируеми

задвигания. В България тяхното използване е още по-ограничено и на практика липсва. Основната причина за относително слабо им разпространение са завишените изисквания към управляващата електроника, особено по отношение на бързодействието на изчислителната част. За да може да се осъществи непрекъснато движение на ротора е необходимо да се следи неговата позиция и малко преди достигане на т.н. подравнена позиция да се извърши комутация на фазата на двигателя. Определянето на ъгъла на комутацията е основна задача за ефективното управление на двигателя. Ъгълът на комутация се определя на база индуктивността на фазата, която има нелинейна зависимост от ъгъла на завъртане на ротора, на тока през намотката и на температурата. Необходими са мощни изчислителни и логически структури с голямо бързодействие за изпълнение на алгоритмите в реално време.

ПРД работи съвместно със силов електронен комутатор - преобразувател, който последователно превключва фазните намотки синхронно с ъгловото положение на ротора. По тази причина, независимо от метода за управление, информацията за позицията на ротора е абсолютно необходима. Ъгловата позиция на ротора може да се измери директно с помощта на сензор - датчик за ъгъл на завъртане или да се изчисли на базата

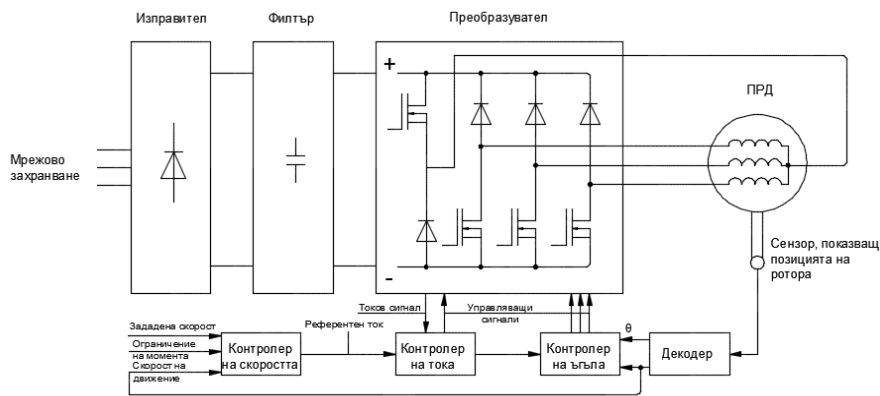
на текущите електрически параметри на двигателя, които са по-достъпни за измерване. Двете основни структури на електрозадвигване с превключваем реактивен двигател са със сензорно и безсензорно управление (Krishnan, 2001, Miller, 2001).

### Сензорно управление

Електрозадвигването със сензорно управление (фиг. 1) се състои от: захранване, преобразувател, двигател, сензори и управляващо устройство - контролер. Двигателят преобразува електрическата енергия в механична за задвигване на товара. Контролерът

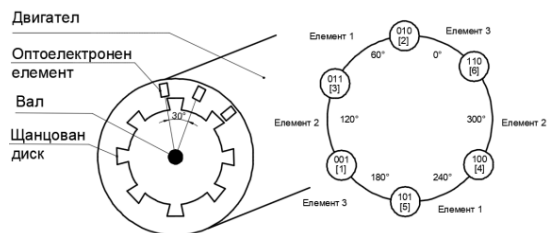
формира съответния управляващ сигнал. Изключително важно е да се определи точното положение на ротора.

Въртящият момент може да се управлява по два начина. Единият е чрез изменение на големината на фазовия ток посредством широчинно-импулсна модулация при константен ъгъл на задържане. Другият е чрез промяна на ъгъла на задържане, но този начин на управление води до увеличаване пулсациите на въртящия момент и по тази причина не се препоръчва. В (DiRenzo, 2000) се предлага управление на ПРД със сензорно управление чрез контролер TMS320F240.



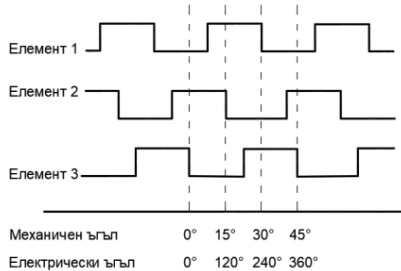
Фиг. 1. Структура на електрозадвигване с ПРД – сензорно управление

Примерно изпълнение на сензор, отчитащ ъгловата позиция на ротора, е показан на (фиг. 2.)



Фиг. 2. Позиционен сензор

Състои се от 3 оптични елемента, монтирани на 30° (механически) един от друг по обиколката на диска, т.е. на 240° (електрически), по този начин се създават изходни сигнали, показани на фиг.3. Получава се симетрична трифазна система, при която сигналът на третия оптичен елемент изостава на 120° от първия сигнал, а сигналът на втория оптичен елемент изостава на 240° от първия т.е. на 120° от сигнала на третия оптичен елемент.



Фиг. 3. Изходни сигнали на оптичните елементи

На всеки 7,5° механичен ъгъл се получава промяна в състоянието на един от трите изходни сигнала, а на всеки 45° цикълът се повтаря. На 45° механичен ъгъл отговарят 360° електрически ъгъл, съответно на 7,5° отговарят 60°. Съответствието между механичните и електрическите ъгли зависи от броя на зъбите или процепите на щанцования диск. На този диск те са 8 - затова ъгловата честота на електрическите сигнали е 8 пъти по-висока от механичната. Механичните ъгли са удобни за управление на скоростта, а електрическите за комутацията.

Основните недостатъци на сензорното управление са свързани със самия сензор за ъгловото положение на ротора на ПРД. Сензорът представлява измервателен преобразувател от механична към електрическа величина. Той изисква механичен монтаж - куплира се на вала на двигателя, а изходните му сигнални проводници се присъединяват към електрическото табло за управление. Проводниците трябва да са защитени не само от механични въздействия, но и от електромагнитни смущения, също така в промишлени условия, често се налага да бъдат защитени от химически агресивната среда. Освен това те не се полагат заедно със силовите проводници. Всичко това оскъпява задвигването. Сензорът носи потенциален риск от повреда и ограничава регулирането на скоростта поради ограничението на разделителната способност на сензора.

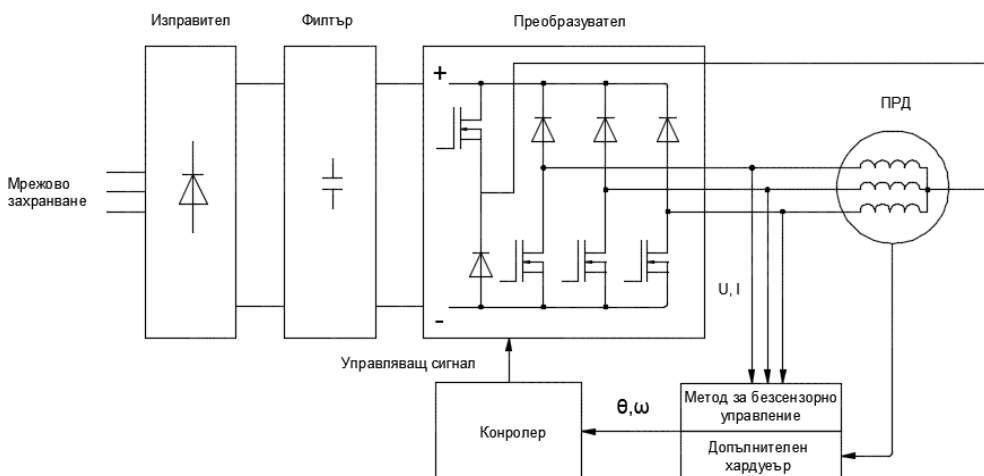
### Безсензорно управление

През последните години се наблюдава сериозен ръст на изследванията в така нареченото безсензорно управление (Gorbounov, Y., Chen, H. 2019). Структурна схема на електрозадвигване с безсензорно управление е показана на фиг.4. Както се вижда от фигурата, силовата



част на електрозадвижването с безсензорно управление е аналогична с тази на сензорното. Съществената разлика е

в определяне на позицията на ротора и като следствие на това системата на управление е с друга структура.



Фиг. 4. Структура на задвижване с ПРД – безсензорно управление

Примерна класификация на методите на безсензорно управление е показана на фиг. 5.



Фиг. 5. Класификация на методите на безсензорно управление

### Преобразуватели, използвани в електрозадвижванията с ПРД

ПРД не могат да работят директно свързани към електрическото захранване, независимо дали то е постоянноково или е от променливотоковата мрежа. В структурата на електрозадвижването с ПРД винаги се включва силов електронен преобразувател. Подробен

анализ на използваните преобразуватели и е направен в (Ahn, et. al, 2010, Mahmoud, et. al, 2013, Emadi, et. al, 2019). Изборът на силов електронен преобразувател в електрозадвижването с ПРД е от съществено значение. Съществуват някои специфични изисквания, с които трябва да се съобразява изборът:

- ✓ Преобразувателят трябва да има възможност да включва следващата фазна намотка на двигателя преди да е изключена предходната. Така е възможно да се препокрива включването на две съседни фазни намотки;
- ✓ За управление на фазовия ток е необходимо да се модулира напрежението с помощта на широчинно-импулсна модулация;
- ✓ Енергията на размагнитване трябва да се върне към източника или да се използва във следващата фаза;
- ✓ В някои приложения трябва да има резонансна верига, за да се приложи превключване с нулево напрежение или нулев ток;
- ✓ Желателно е използване на минимален брой полупроводникови елементи.

Класификацията на използваните преобразуватели в задвижванията с превключваеми реактивни двигатели е показана на фиг.6.



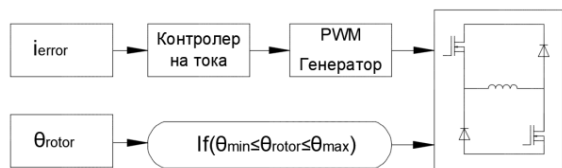
\*m - брой на фазите

Фиг. 6. Класификация на преобразувателите

Преобразувателите за задвижвания с ПРД се захранват с постоянно напрежение, което най-често се получава от токоизправител, свързан с променливотоковата мрежа. Между изправителя и преобразувателя се свързва кондензатор, както е показано на фиг.1 и фиг.4. В практиката приложение са намерили пасивни и активни филтри. По-често се използват пасивни филтри поради тяхната надеждност и по-малкото елементи, които ги изграждат. Например, когато се използва само кондензатор, който е свързан към положителната и отрицателната шина на постоянното напрежение (фиг. 9,10,11а). В някои случаи е целесъобразно да се използват пасивни филтри с кондензатор и диод (фиг. 11б). Активните филтри се подразделят на такива с отделно захранване или свързани към основното захранване.

Най-използваните преобразуватели в електрозадвижванията с ПРД са:

✓ **Асиметричен мостов преобразувател** (фиг. 9) - позволява независим контрол на токовете във фазите, следователно поддържа добър контрол на въртящия момент. Като недостатък може да се отбележи наличието на голям брой полупроводникови елементи. При използването на един сигнал за управление на двата транзистора в едната фаза на асиметричния мостов преобразувател е възможно съответната фазна намотка на двигателя да попада само към две стойности на напрежението, положително напрежение от захранващата постояннотокова шина (+Udc) или същото напрежение, но отрицателно, т.е. подадено в обратна посока (-Udc). Подаване на положително напрежение съответства на случая когато двата транзистора са в проводящо състояние, а подаване на отрицателно напрежение съответства на случая, когато диодите на асиметричния мостов преобразувател са в проводящо състояние. Недостатък на този начин на управление е, че не се използват пълните възможности на преобразувателя. Когато към асиметричния мостов преобразувател се подават два сигнала за управление е възможно на изходните клеми да се формира напрежение с три нива, +Udc, 0 или -Udc. На фиг. 7 е представено управление на транзисторите с два сигнала. Първият е резултат от контролера на тока, а вторият за управление при определена позиция на ротора.



Фиг. 7. Управление на асиметричен преобразувател с два сигнала.

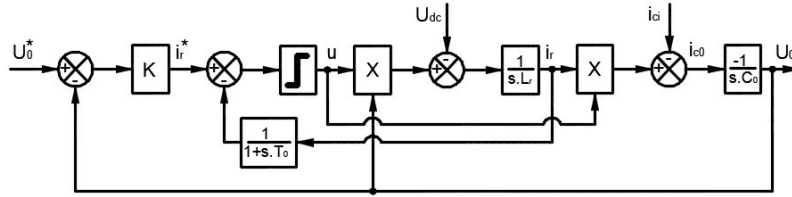
✓ **m+1 преобразувател** (фиг. 10) - при електрозадвижванията с ПРД фазовата намотка не провежда ток по време на целия цикъл, следователно някои от полупроводниковите елементи може да се споделят между различни фазови намотки. В този преобразувател трите фази на ПРД са свързани към четири електронни ключа. Намаляването на броя на силовите транзистори в сравнение с асиметричния преобразувател е постигнато чрез споделяне на

транзистор между две фазови намотки. Когато ПРД работи с ниска скорост фазовият ток може да намалее бързо поради индуцираното напрежение, следователно не се получава припокриване между различни фазови токове и токът на всяка фаза може да се контролира независимо, но при високи скорости не е така. Получава се зона на припокриване и комутацията на втората фаза ще се забави по време спрямо първата, следователно се губи възможността за независимо управление на фазите и в това се изразява недостатъкът на този преобразувател. Например, когато се изисква фаза А да бъде изключена, T1 и T2 трябва да бъдат изключени и така фазовият ток ще намалее до 0 като тече през диодите D1 и D2. Ако фазата В трябва да бъде възбудена преди токът на фаза А да спадне до 0 T2 и T3 трябва да бъдат включени, следователно има противоречие относно състоянието на T2. При работа с висока скорост, по време на комутацията от фаза А към фаза В е възможно да се получи припокриване на токовете. За да се избегне това, ъгълът на проводимост на фаза В трябва да се забави във времето. Забавянето на ъгъла на проводимост на поредната фаза води до намаляване на въртящия момент.

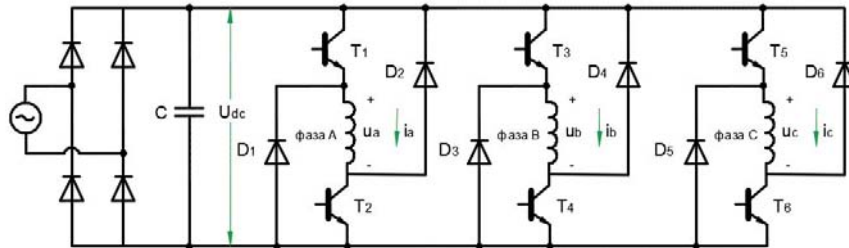
**С dump преобразувател** (фиг. 11а) чрез преобразувателя, изпълнен по показаната схема, се осигурява независимо управление на двете фази. Схемата осигурява по-високо напрежение на размагнитване по време на комутация, което води до по-високи стойности на напрежението на захранващите устройства. При тази схема не е възможно получаването на нулево напрежение във веригата, поради което се елиминира допълнителна степен на свобода при управлението на тока, което води до увеличаване на акустичния шум. Освен това, фазовата намотка е или под постоянното напрежение на захранването, или на напрежението между кондензатора C1. Това обстоятелство не само съкращава живота на изолацията на проводниците, но също е източник на допълнителни загуби. Тези недостатъци се елиминират с поставяне на транзистор Tf и схемата добива вида, показан на фиг. 11б.

**Управление на напрежението върху кондензатора C1**

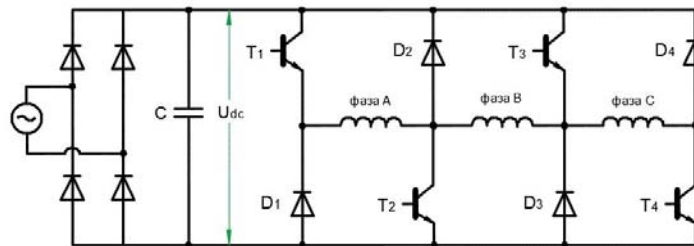
Основните проблеми са: колебанието на напрежението във веригата на кондензатора C0 и пулсациите на тока  $i_r$ , който протича през бобината  $L_r$ . За намаляване на разликата между върховия и средния ток се избира по-голяма стойност на  $L_r$ . Тези проблеми се решават чрез използване на обратни връзки по ток и напрежение в системата на управление. Вътрешният контур е за управление на тока  $i_r$ , а външният – за управление на напрежението на кондензатора. В обратната връзка на тока е въведен филтър от първи ред – токът се връща с времева константа  $T_0$ . На фиг. 8 е показано как се реализира управлението върху кондензатора C1. Сигналът  $\mu$  е свързан с превключването на транзистора  $T_r$  ( $\mu=1$ ,  $T_r$ →включен;  $\mu=0$ ,  $T_r$ →изключен). Всеки път когато  $T_r$  е включен протича ток през  $L_r$ , което се дължи на разликата между  $U_0$  и  $U_{dc}$ . Разликата между входящия ток и тока  $i_r$  е токът през кондензаторът C1, който определя неговото напрежение  $U$ .



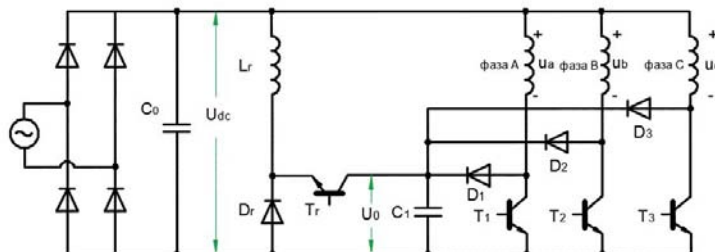
Фиг.8. Управление на напрежението върху кондензатора C1



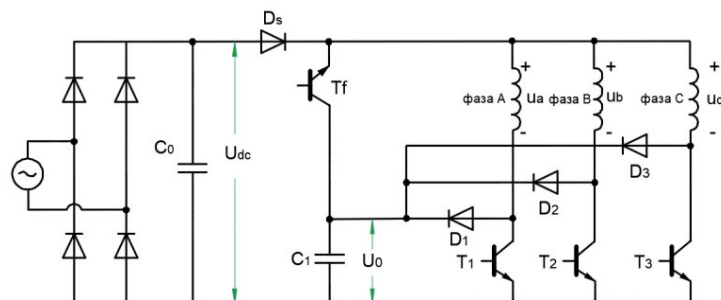
Фиг. 9. Асиметричен мостов преобразувател



Фиг. 10. m+1 преобразувател



Фиг. 11а. C-dump преобразувател

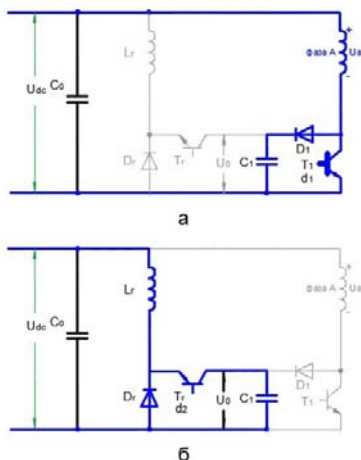


Фиг. 11б. C-dump преобразувател с транзистор за свободен ход.

### Състояния при работата на C-dump преобразувател

За анализиране на начина на работа е достатъчно да се разглежда само една фаза, в случая фаза А. Съставна част на C-dump преобразувателя е веригата, в която участват следните елементи: захранването на постоянноковата шина със своето напрежение  $U_{dc}$ , същото е върху кондензатора  $C_0$ , индуктивността на

фазната намотка на фаза А, транзисторът  $T_1$ , диодът  $D_1$  и кондензаторът  $C_1$ . По схемата на свързване и начина на работа елементите съставят, от една страна схема на повишаващ преобразувател (фиг. 12а), а от друга страна кондензаторът  $C_1$ , транзисторът  $T_r$ , диодът  $D_r$ , бобината  $L_r$  и захранването с кондензатора  $C_0$  - схема на понижаващ преобразувател (фиг. 12б).

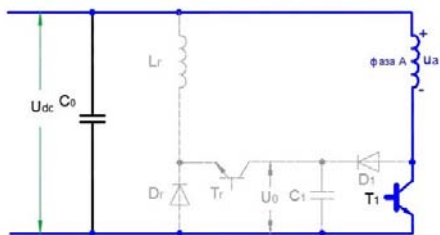


Фиг. 12. а – повишаващ преобразувател, б – понижаващ преобразувател

Транзисторът T1 се използва за управление на фазовия ток, а Tr за управление на напрежението на кондензаторът C1. Когато токът във фаза A е под зададения, транзисторът T1 се включва и към намотката се прилага напрежението Udc. Когато токът във фазата надвиши зададения, T1 се изключва и върху намотката се прилага разликата между напреженията на постоянноотковата шина (Udc) и напрежението (U0), което е върху кондензатора C1. Например, когато токът във фаза A е под зададения и Tr е включен, фаза A работи в състояние 2. Когато токът трябва да протече във фаза B, T2 е включен, а T1 е изключен. Токът във фаза B протича през C0 и T2, а токът във фаза A – D1, C0 и C1. По този начин се осигурява независимо управление на двете фази. Транзисторът Tr се използва за управление на U0 за осигуряване на по-високо напрежение на размагнитване по време на комутация, което води до по-високи стойности на захранващото напрежение. Това е преобразувател с твърда комутация, защото транзисторите и диодите се включват и изключват, докато техните напрежения и токове са различни от нула.

**Състояние на схемата 1: T1- включен, Tr – изключен**

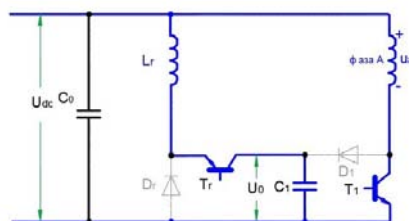
Схемата на електрическата верига при състояние 1 е показана на фиг.13. При това състояние е включен транзистор T1, като в същото време транзисторът Tr е изключен. T1 подава захранващото напрежение към намотката на фаза A. Трябва да се отбележи, че T1 се включва многократно по време на формирането на токовия импулс през фазата. При първото му включване в рамките на времетраенето на действието на фаза A, токът в намотката започва да расте от нула, а при следващите включвания началният ток вече има някаква стойност, която е в зависимост от необходимостта фазата да създава определен електромагнитен момент на двигателя.



Фиг. 13. Състояние 1

**Състояние 2: T1- включен, Tr – включен**

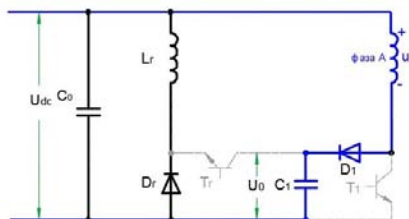
Схемата на електрическата верига при състояние 2 е показана на фиг.14. Когато се включи транзисторът Tr, който работи в схема на понижаващ импулсен преобразувател, започва прехвърляне на енергията от кондензатора C1 към бобината Lr и към кондензатора C0, свързан към захранващия източник. Може да се каже, че се връща енергия обратно към захранването. В същото време транзисторът T1 продължава да е включен както в състояние 1 и токът през фазовата намотка продължава да расте, като по този начин се повишава запасената магнитна енергия в двигателя.



Фиг. 14. Състояние 2

**Състояние 3: T1- изключен, Tr – изключен**

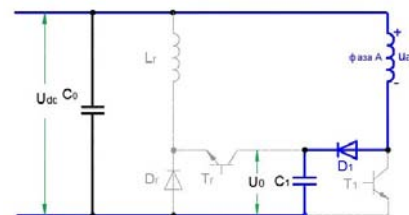
Схемата на електрическата верига при състояние 3 е показана на фиг.15. В това състояние двата транзистора са изключени. В схемата на преобразувателя се образуват два токови контура. В състава на единия влизат фазната намотка със своята индуктивност L, диодът D1 и кондензаторът C1. Част от запасената магнитна енергия зарежда кондензатора C1. В другия контур участват индуктивността Lr, диодът Dr и захранването с кондензатора C0. Прехвърля се енергия от индуктивността Lr към захранването. Така и в това състояние продължава да се връща енергия обратно към захранването. Това е процес, който е започнал в състояние 2.



Фиг. 15. Състояние 3

**Състояние 4: Комутация на фазовия ток**

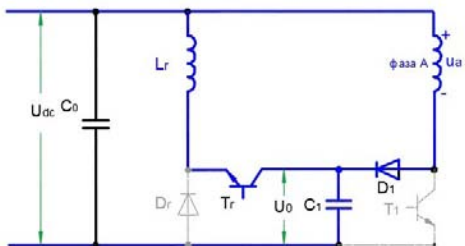
Схемата на електрическата верига при състояние 4 е показана на фиг.16. В това състояние се прави комутация на фазовия ток. Той трябва бързо да се намали до нула. През това време транзисторът T1 е изключен и енергията на двигателя се прехвърля към кондензатора C1. По време на това състояние напрежението върху кондензатора C1 се увеличава. Токът намалява тъй като напрежението на двигателя е разликата от захранващото напрежение и това на кондензатора C1.



Фиг. 16. Състояние 4

**Състояние 5: T1- изключен, Tг – включен**

Схемата на електрическата верига при състояние 5 е показана на фиг.17. Това състояние е необходимо когато токът във фазата се управлява чрез изключване на транзистор T1. Фазната намотка на двигателя е свързана във верига както в състояние 4. В същото време транзистор Tг е включен прехвърляйки енергия от C1 към обината Lr и захранването както в състояние 2.



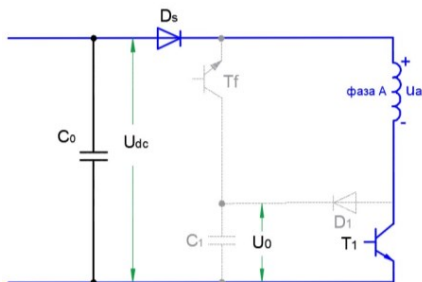
Фиг. 17. Състояние 5

**C-dump преобразувател с транзистор за свободен ход**

На фиг. 11б от една страна е въведен транзистор Tf, който служи за зареждане на кондензатора C1, а от друга е премахната индуктивността Lr.

**Състояние 1: T1- включен, Tг – изключен**

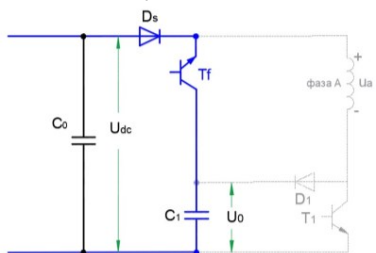
Схемата на електрическата верига при състояние 1 е показана на фиг.18. (за фаза A), когато транзисторът T1 е включен.



Фиг. 18. Състояние 1

**Състояние 2: T1- изключен, Tг – включен**

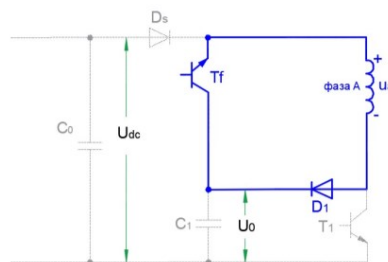
Схемата на електрическата верига при състояние 2 е показана на фиг.19. Когато токът надвиши зададена стойност се изключва T1 и се включва Tf. Тогава започва зареждане на кондензатора C1.



Фиг. 19. Състояние 2

**Състояние 3: Tf- включен, D1 – включен**

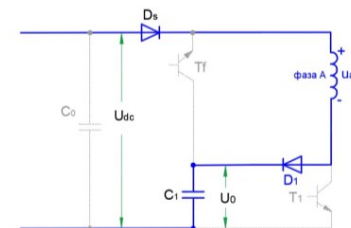
Схемата на електрическата верига при състояние 3 е показана на фиг. 20. Напрежението на кондензатора надвишава захранващото и чрез Tf и D1 се захранва фаза A (напрежението във фазата на двигателя е почти нула).



Фиг. 20. Състояние 3

**Състояние 4: Tf- изключен, D1 – включен**

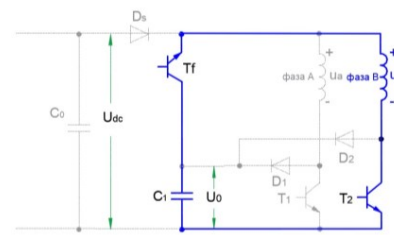
Схемата на електрическата верига при състояние 4 е показана на фиг.21. Когато се комутира токът във фазата T1 се изключва без да се включва Tf, което позволява частично прехвърляне на енергията от ПРД към C1 и частично за преобразуване на енергия в машината. По време на това състояние напрежението във фазата на машината е Udc-U0.



Фиг. 21. Състояние 4

**Състояние 5: Tf- включен, D1 – изключен**

Схемата на електрическата верига при състояние 5 е показана на фиг. 22. Когато фаза A е напълно комутирана, енергията в C1 може да бъде използвана като се насочи към фаза B или C чрез включване на Tf. Диодът Ds е запушен, което позволява напрежението U0 да бъде приложено върху проводящата фаза за по-бързо нарастване на тока.



Фиг. 22. Състояние 5

По време на всички тези състояния се постига независимо управление на фазите с достатъчна гъвкавост за по-добра динамика на задвижващата система.

Предимствата на преобразувателя са:

- ✓ Пулсациите в тока са по-малки, защото няма трансфер на енергия от машината към източника на постоянен ток;
- ✓ Постига се положително, нулево и отрицателно напрежение върху фазните намотки с положителен ефект от по-висока гъвкавост на управлението, по-нисък акустичен шум, по-ниски диелектрични загуби в машината и по-дълъг живот на изолацията;
- ✓ По-високото напрежение на C1 се използва за по-добро управление на тока и въртящия момент, особено при по-високи скорости, където напрежението от източника е недостатъчно за ефективно динамично и стабилно управление.

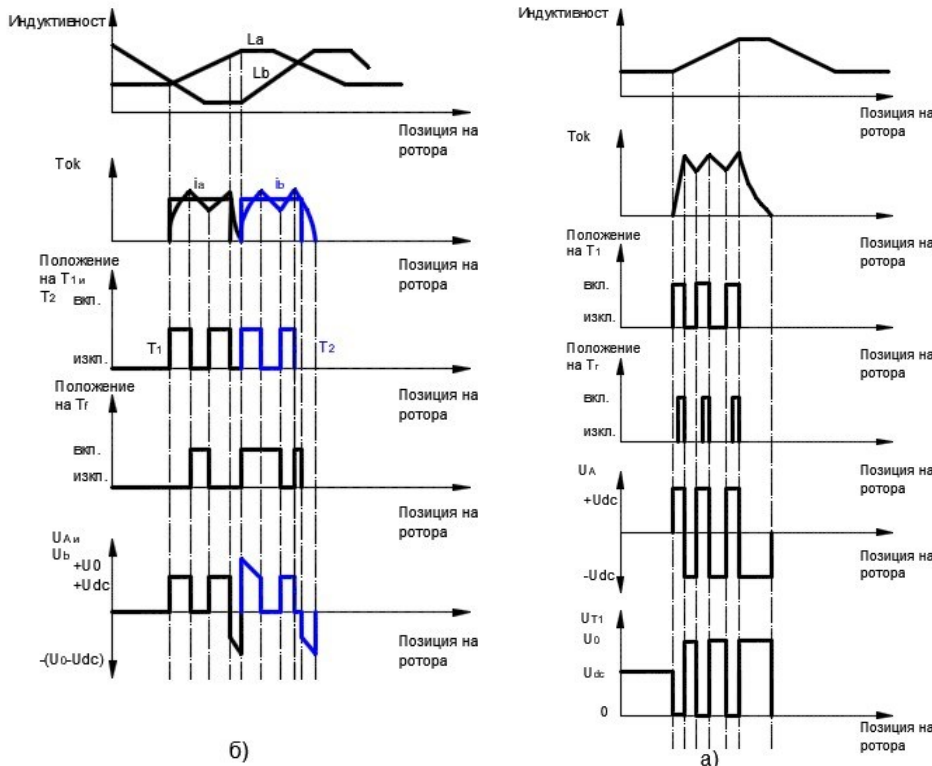


- Недостатъците на преобразувателя са:
- ✓ Възможна е само работа в двигателен режим;
  - ✓ Стойността на  $T_f$  е много по-голяма от стойността на другите транзистори.

Координацията на управлението между превключвателя за свободен ход и главните фазови превключватели по време на комутация с припокриващи се фазови токове ограничава гъвкавостта и свободата на

управление. Това би довело до по-дълго време за комутация с възможна регенерация и увеличаване на акустичния шум.

На Фигура 23 са показани формите на индуктивността, тока, управляващите сигнали и напрежението на преобразувателите от фиг. 11 – а и б.



Фиг. 23. Управление на преобразувателите от фигура 11.

## Заклучение

В заключение на изложеното до тук може да се отбележи, че за ефективно и функционално електрозадвигване, изборът на преобразувател и метод на управление е от съществено значение. Анализът на структурите на електрозадвигвания с ПРД, показва предимствата на безсензорното управление в минната индустрия, където изискванията по отношение на надеждност и ниска енергоемкост са на преден план. Системите с безсензорно управление чрез усъвършенстване могат да отговорят на изискванията за устойчивост и точност. Установени са предимствата и недостатъците на най-често използваните преобразуватели с оглед използването им в електрозадвигване с широк диапазон на скоростта.

## Литература

Ahn, J., Liang, J., Lee, D. (2010). Classification and Analysis of Switched Reluctance Converters, *Journal of Electrical*

*Engineering & Technology* Vol. 5, No. 4, pp. 571~579, 2010

DiRenzo, M. (2000). *Switched Reluctance Motor Control – Basic Operation and Example Using the TMS320F240.* Application Report, 2000.

Emadi, A., Jiang, J. Bilgin, B. (2019). *Switched Reluctance Motor Drives Fundamentals to Applications.* Boca Raton : Taylor & Francis Group, 2019. стр. 825.

Gorbounov, Y., Chen, H. (2019). Technological aspects and applications of large power switched reluctance motors in mining, *Journal of Mining and Geological Sciences, University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski",* Vol. 62, pp.86-91, ISSN 2738-8816, 03 Nov.2019.

Krishnan, R. (2001). *Switched Reluctance Motor Drives: Modeling, Simulation, Analysis, Design, and Applications.* CRC Press, 2001.

Mahmoud, S., Sherif, M., Aliem, E. (2013). Studying Different Types of Power Converters Fed Switched Reluctance Motor. *International Journal of Electronics and Electrical Engineering* Vol. 1, No. 4, December, 2013

Miller, T. (2001). *Electronic control of switched reluctance machines.* Newnes, Reed Educational and Professional Publishing Ltd

# HYDRAULIC SYSTEM DIMENSION METHOD FOR UNLOADING THE BASKET ON LOW-PLATFORM DUMPERS

Lyuben Tasev

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, Sofia, Bulgaria, E-mail: luben.tasev@mgu.bg

**ABSTRACT.** The article proposes a methodology for dimensioning the power cylinders for unloading the basket of low-platform dump trucks. A mathematical model of the unloading process was made, based on which the applied forces on the power cylinders were calculated. Options are offered for selecting cylinders and a pump to drive the cylinders.

**Key words:** hydraulic power transmission, low platform dump car, hydraulic power cylinders, methodology

## МЕТОДИКА ЗА ОРАЗМЕРЯВАНЕ НА ХИДРАВЛИЧНАТА СИСТЕМА ЗА РАЗТОВАРВАНЕ НА КОША НА НИСКОПЛАТФОРМЕНИ САМОСВАЛИ

Любен Тасев

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

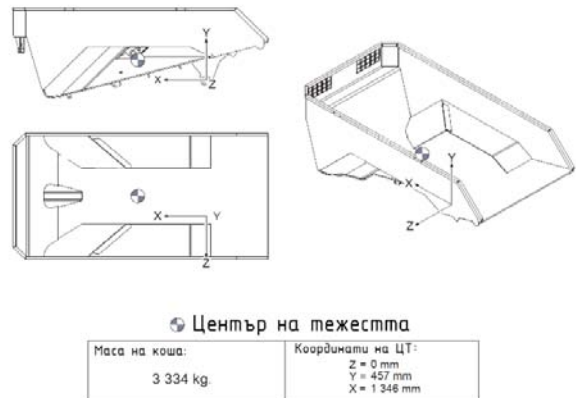
**РЕЗЮМЕ** В статията се предлага методика за оразмеряване на силвите цилиндри за разтоварването на коша на нископлатформени самосвали. Направен е математически модел на процеса на разтоварване, на базата на който са пресметнати приложените сили върху силвите цилиндри. Предложени са варианти за избор на цилиндри и помпа за задвижването на цилиндрите.

**Ключови думи:** хидравлично задвижване, нископлатформен самосвал, хидравлични силови цилиндри, методология

### Въведение

Нископлатформените руднични транспортни средства добиват все по голямо значение в транспортните схеми на подземните рудници. Тяхната автономност и маневреност са част от предимствата, които ги правят предпочитани пред други решения. Опитът показва, че в рамките на един ден самосвалите могат да извършват повече от двадесет товаро-разтоварни операции, а за целия период на експлоатация – повече от десет хиляди.

Определянето на проектите натоварвания и определянето на параметрите на хидравличното задвижването на коша е важна част от ремонта и поддръжката на машините. В статията се предлага методология за изчисляване на силното хидравлично задвижване на разтоварващия механизъм на кофата на нископлатформени самосвали. Приложен е пример на изчисленията за 10.5 м<sup>3</sup> кофа. В методологията е прието, че товарът е монолитен. На фиг. 1 е показана схема на разположението на кофата и силвите цилиндри. На фиг. 2 са показани основните геометрични размери и центъра на тежестта на самата кофа.



Фиг. 2

### ИЗЛОЖЕНИЕ

#### 1. Определяне на силата в хидравличните цилиндри

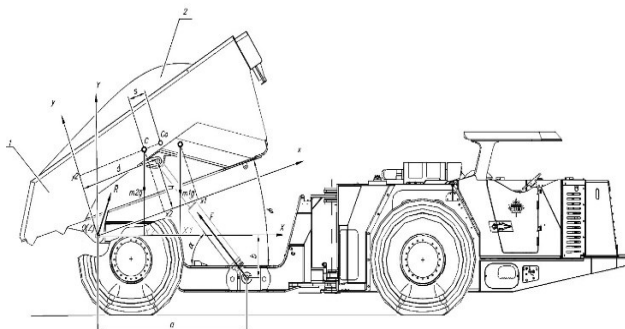
Процесът по разтоварване се състои от два етапа. При първия етап товарът е неподвижен, а при втория движението на товара започва когато кошът се издигне до ъгъла на естествения откос и завършва с цялостното му разтоварване.

Преди преместването на товара, силата  $F$  в хидравличните цилиндри може да се определи по следната формула :

$$F = \frac{m_1 \cdot g \cdot X_1 + m_2 \cdot g \cdot X_2}{a \cdot \sin \alpha - b \cdot \cos \alpha}, [N] \quad (1)$$

където  $X_1$  и  $X_2$  са координатите на центъра на тежестта в неподвижната координатна система  $OXYZ$ :

$$X_k = x_k \cdot \cos \varphi - y_k \cdot \sin \varphi, (k=1;2) \quad (2)$$

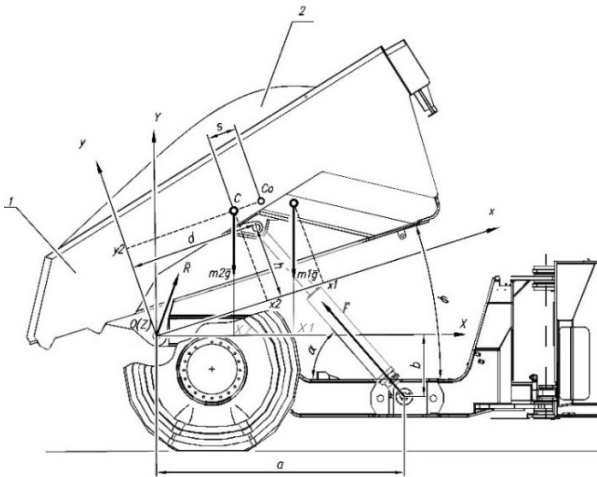


Фиг. 1.

Оттук се намират координатите в началния момент на повдигане на коша:

$$X_1 = 1,346 \cdot \cos 0^\circ - 0,457 \cdot \sin 0^\circ = 1,346$$

$$X_2 = 1,150 \cdot \cos 0^\circ - 0,800 \cdot \sin 0^\circ = 1,016$$



Фиг. 3

При въртене на коша, ъгълът на наклон на изпълнителните цилиндри се определя от следните геометрични зависимости:

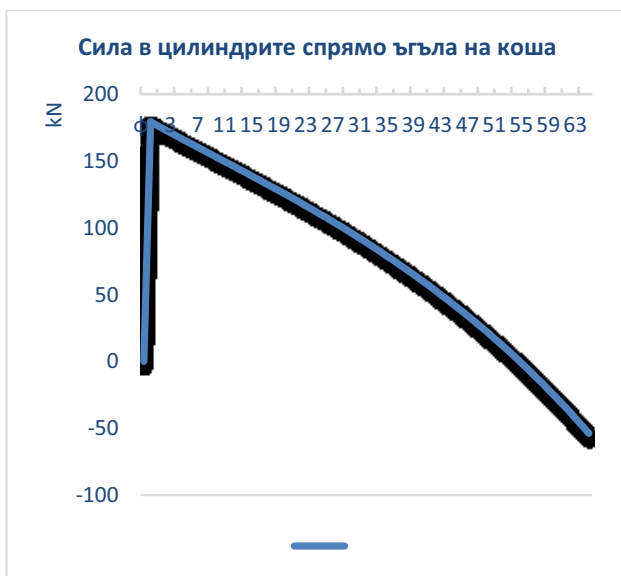
$$\alpha = \arctg \left( \frac{b+d \cdot \sin \varphi + h \cdot \cos \varphi}{a-d \cdot \cos \varphi + h \cdot \sin \varphi} \right), [^\circ] \quad (3)$$

В начално състояние на коша ( $0^\circ$ ), наклонът на изпълнителните цилиндри е:

$$\alpha = \arctg \left( \frac{0,610 + 1,195 \cdot \sin 0^\circ + 0,685 \cdot \cos 0^\circ}{2,286 - 1,195 \cdot \cos 0^\circ + 0,685 \cdot \sin 0^\circ} \right) = 50^\circ$$

Оттук се получава силата в цилиндрите в начално положение на коша:

$$F = \frac{3\,334,981 \cdot 1,346 + 20\,000,981 \cdot 1,016}{2,286 \cdot \sin 50^\circ - 0,610 \cdot \cos 50^\circ} = 179\,074 \text{ N}$$



Тъй като изпълнителните хидравлични цилиндри са 2, максималното усилието във всеки един от тях ще бъде:

$$F_{\text{цил}} = F/2 = 179\,074/2 = 89\,537 \text{ N}$$

## 2. Определяне на реакцията в шарнира на коша

$$R_x = F \cdot \cos \alpha, [N] \quad (4)$$

$$R_x = 179\,074 \cdot \cos 50^\circ = 115\,106 \text{ N}$$

$$R_y = m_1 \cdot g + m_2 \cdot g - F \cdot \sin \alpha, [N] \quad (5)$$

$$R_y = 3334,981 + 20\,000,981 - 179\,074 \cdot \sin 50^\circ = 91\,729 \text{ N}$$

$$R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2}, [N] \quad (6)$$

$$R = \sqrt{115\,106^2 + 91\,729^2} = 147\,186 \text{ N}$$

Определяне на диаметъра на хидравличните цилиндри- D

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot F_{\text{цил}}}{\pi \cdot P_{\text{раб}}}}, [m] \quad (7)$$

където  $P_{\text{раб}}$  е работното налягане на хидравличната система за повдигане на коша (Табл.1)

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot 89\,537}{\pi \cdot 15 \cdot 10^6}} = 0,089 \text{ m}$$

## Определяне на дължината и хода на изпълнителните цилиндри

$$R = \sqrt{h^2 + d^2}, [m] \quad (8)$$

$$R = \sqrt{0,685^2 + 1,195^2} = 1,377 \text{ m}$$

$$\beta = \sin^{-1} \left( \frac{h}{R} \right), [^\circ] \quad (9)$$

$$\beta = \sin^{-1} \left( \frac{0,685}{1,377} \right) \approx 30^\circ \Rightarrow \gamma = 5^\circ$$

$$x_2 = 1,373 \cdot \cos 5^\circ = 0,996$$

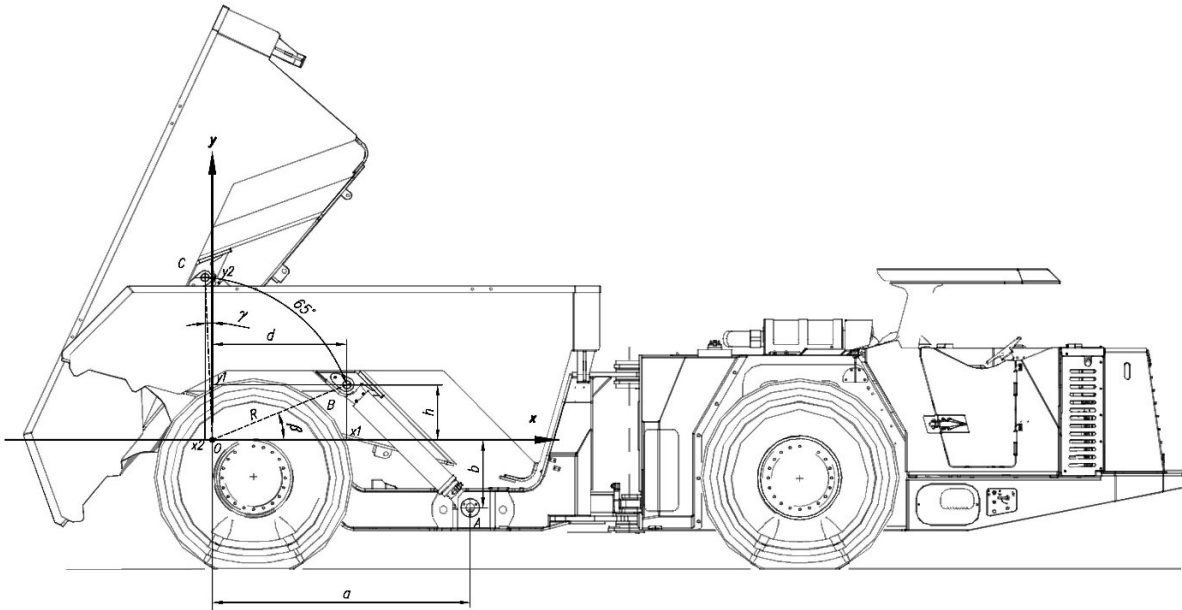
$$y_2 = 1,373 \cdot \sin 5^\circ = 0,087$$

Дължината на хидравличния цилиндър в събрано състояние е:

$$AB = \sqrt{(a-d)^2 + (b-h)^2} = \sqrt{(2,286 - 1,195)^2 + (-0,610 - 0,685)^2} = 1,693 \text{ m}$$

Дължината на хидравличния цилиндър в удължено състояние е:

$$AC = \sqrt{[a - (-x_2)]^2 + (-b - y_2)^2} = \sqrt{[2,286 - (-0,996)]^2 + (-0,610 - 0,087)^2} = 3,355 \text{ m}$$



Фиг. 4

Дължината на хода на буталото  $L$  е:

$$L = AC - AB = 3,355 - 1,693 = 1,662\text{m}$$

Избор на стандартен диаметър на хидравличния цилиндър  $D_{\text{ст}}$ , отговарящ на условието  $D \leq D_{\text{ст}}$ , в случая  $D_{\text{ст}}=100\text{ mm}$ .

Избор на стандартен диаметър на буталния прът  $D_{\text{ст}}$

За избрания диаметър  $D_{\text{ст}}$  на хидравличния цилиндър се предлагат два размера бутални пръти – 63mm и 70mm. Избира се по-малкия (63mm) и се прави проверка за устойчивостта му на изкълчване спрямо изчислената дължина  $L$ .

Критичната сила  $F_{\text{кр}}$  по формулата на Ойлер е:

$$F_{\text{кр}} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{v \cdot \beta \cdot L^2}, [\text{N}] \text{ ако } \lambda > \lambda_p; \quad (10)$$

Критичната сила  $F_{\text{кр}}$  по формулата на Тетмайер е:

$$F_{\text{кр}} = \frac{d^2 \cdot \pi \cdot (335 - 0,62 \cdot \lambda)}{4 \cdot v}, [\text{N}] \text{ ако } \lambda \leq \lambda_p, \quad (11)$$

където:

$E=2,1 \cdot 10^{11}$  Pa – модул на еластичност на буталния прът;

$R_e=355$  MPa – граница на провлачване на материала;

$v=3,5$  – коефициент на сигурност;

$\beta=1$  – II Ойлеров случай (II);

$I$  – инерционен момент на прът с кръгло сечение:

$$I = \frac{d_{\text{ст}}^4 \cdot \pi}{64}, [m^4]; \quad (12)$$

$$I = \frac{0,063^4 \cdot 3,14}{64} = 77,3 \cdot 10^{-8} m^4$$

I Ойлеров случай	II Ойлеров случай	III Ойлеров случай	IV Ойлеров случай
$\beta = 2$	$\beta = 1$	$\beta = 0,7$	$\beta = 0,5$

$\lambda$  и  $\lambda_p$ - гранични стойности:

$$\lambda = \frac{4 \cdot \beta \cdot L}{d} \quad (13)$$

$$\lambda = \frac{4 \cdot 1 \cdot 1,662}{0,063} = 105,5$$

$$\lambda_p = \pi \sqrt{\frac{E}{0,8 \cdot R_e}} \quad (14)$$

$$\lambda_p = 3,14 \sqrt{\frac{2,1 \cdot 10^{11}}{0,8 \cdot 355}} = 85,4,$$

следователно изчисленията се правят по формулата на Ойлер:

$$F_{\text{кр}} = \frac{3,14^2 \cdot 2,1 \cdot 10^{11} \cdot 77,3 \cdot 10^{-8}}{3,5 \cdot 1 \cdot 1,662^2} = 165\,550\text{ N}$$

За да е устойчив на изкълчване, избрания прът на хидравличния цилиндър трябва да отговаря на условието:

$$F_{\text{цил}} < F_{\text{кр}}, \quad (15)$$

в случая  $89\,537\text{ N} < 165\,550\text{ N}$ , откъдето следва, че диаметърът на пръта е подходящо избран.

Необходима скорост на движение на буталния прът  $v_{\text{бут}}$  се изчислява по формулата:

$$v_{\text{бут}} = \frac{L}{t_{\text{разт}}}, [m/s] \quad (16)$$

$$v_{\text{бут}} = \frac{1,662}{13} = 0,128 \text{ m/s}$$

$$V_T = \frac{Q_H}{n_{\text{max}}}, [m^3] \quad (19)$$

$$V_T = \frac{126,63}{2200} = 0,0575m^3 = 57,5 \text{ cm}^3$$

### 3. Избор на аксиално-бутална хидравлична помпа

Таблица 1.

Технически характеристики на аксиално-бутални помпи

Размер	NG	45	56	63	80	90	107	125	
Геометричен обем, на оборот	$V_g$	cm <sup>3</sup>	44.9	56.6	63.0	79.8	90.5	106.7	125.0
Скорост на въртене на вала	$n_{\text{max}}$	rpm	2 200	2 200	2 200	2 000	1 800	1 600	1 600
		rpm	4 250	3 750	3 750	3 350	3 350	3 000	3 000
Дебит при $n_{\text{max}}$	$q_v$	l/min	99	125	139	144	163	171	200
Въртищ момент при $p_r = 400 \text{ bar}$	$M$	Nm	286	360	401	508	576	679	796

Обемен разход (дебит), нужен за преместването на двата бутални пръта с необходимата скорост- Q:

$$Q = 2 \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot v_{\text{бут}}, [m^3/s] \quad (17)$$

$$Q = 2 \cdot \frac{\pi \cdot 100^2}{4} \cdot 0,128 = 2 \cdot \frac{0,0785}{4} \cdot 0,128 = 0,00201 \text{ m}^3/s = 120,6 \text{ l/min}$$

#### Изчисляване на необходимия дебит на помпата- $Q_H$

Производителността на помпата трябва да осигурява необходимия дебит за захранването на изпълнителните цилиндри и за компенсирането на загубите в хлабините на хидравличната система (утечки). За това при избора на хидравлична помпа той условно се приема

$$Q_H = Q(1,05 \div 1,1), \quad (18)$$

в случая:

$$Q_H = 120,6 \cdot 1,05 = 126,63 \text{ l/min}$$

Теоретичният геометричен обем на помпата –  $V_T$  се изчислява по формулата:

#### Избор на стандартен размер на аксиално-бутална помпа

Според изчисления геометричен обем се избира помпа със стандартен размер (от табл. 1), която отговаря на условието:

$$V_g \geq V_T, \quad (20)$$

в случая се избира помпа с работен обем  $V_g = 63 \text{ cm}^3$

#### Заклучение

Предложената методология може да послужи на студенти от машините специалности на техническите университети при разработването на проекти и дипломни работи.

Настоящата методология би била полезна и на механиците в рудничните предприятия в ремонтните дейности на наличните машини.

#### Литература

- Гойдо, М.Е. (2009). *Проектирование объемных гидроприводов*, Машиностроение.
- Корпачев В. П., Андрияс А. А., Пережилин А. И., (2012). *Основы проектирования объемного гидропровода*. СибГТУ.
- Iliev, Zh. (2015). Determination of technological parameters of hydro transport installation for coals, *Proceedings of the XIII-th National conference with international participation of the open and underwater mining of minerals, 1-5, Varna, ISSN: 1314-8877*.
- Yu N Baryshnikov. (2017). Computing experiment for unloading dumper truck at a sloping pad. *Fundamental and Applied Problems of Mechanics*.





**СЕКЦИЯ**

**УСТОЙЧИВО РАЗВИТИЕ НА МИНЕРАЛНО-  
СУРОВИННАТА ИНДУСТРИЯ**

**SECTION**

**SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF THE MINERAL  
AND ROW MATERIAL INDUSTRY**



# A STRUCTURED MODEL FOR THE IMPLEMENTATION OF TQM IN AGGREGATE EXTRACTION

*Georgi Kondev, Irena Mihaylova*

*University of Chemical Technology and Metallurgy, 1756 Sofia; E-mail: kondev@uctm.edu, ir.mihaylova@nikas.bg  
Corresponding author: kondev@uctm.edu*

**ABSTRACT.** The Total Quality Management (TQM) approach is a management philosophy that is applied by organizations operating in various sectors of the national and global economy. The present study aims to describe the possibilities of applying key elements of TQM in the mining of aggregates. In the research process, eight elements directly related to basic processes and activities affecting the management of an organization were identified. These elements are: leadership, customer management, people management, supplier management, information management, process management, organizational learning and continuous improvement. A questionnaire survey was also conducted to assess the level of implementation of the identified TQM elements. The results of the survey show that customer management, processes and leadership are represented to a greater extent than others, and information management is the least recognized. Key practices that make up the individual elements were also successfully identified. Based on an analysis of the results, a structural framework was developed for the application of TQM in the mining of aggregates.

**Key words:** total quality management, people management, supplier management, business performance.

## СТРУКТУРИРАН МОДЕЛ ЗА ПРИЛАГАНЕ НА ЦЯЛОСТНО УПРАВЛЕНИЕ НА КАЧЕСТВОТО ПРИ ДОБИВА НА ИНЕРТНИ МАТЕРИАЛИ

*Георги Кондев, Ирена Михайлова*

*Химико-технологичен и металургичен университет, 1756 София*

**РЕЗЮМЕ.** Подходът за цялостно управление на качеството е философия за управление, която се прилага от организации, работещи в различни сектори на националната и световната икономика. Настоящото изследване има за цел да опише възможностите за прилагане на ключови елементи на цялостно управление на качеството при добива на инертни материали. В процеса на изследване бяха идентифицирани осем елемента, пряко свързани с основните процеси и дейности, засягащи управлението на една организация. Тези елементи са: ръководни умения, управление на клиенти, управление на служители, управление на доставчици, управление на информация, управление на процеси, организационно обучение и непрекъснато усъвършенстване. Проведено е и анкетно проучване за оценка на степента на прилагане на идентифицираните елементи на цялостното управление на качеството. Резултатите от проучването показват, че управлението на клиентите, на процесите и на ръководните умения са представени в по-голяма степен от останалите, а управлението на информацията е най-слабо познато. Успешно бяха идентифицирани и ключови практики, които съставляват отделните елементи. Въз основа на анализ на резултатите беше разработена структурна рамка за прилагане на цялостното управление на качеството при добива на инертни материали.

**Key words:** цялостно управление на качеството, управление на служители, управление на доставчици, бизнес резултати.

## Introduction

Research on the applicability of the Total Quality Management (TQM) approach can be summarised in several key areas. The first of them is described by authors who observe the application of the principles and elements of TQM in the processes implemented by organisations in various sectors of the economy. (Delgado-Hernandez and Aspinwall, 2008; Koh and Low, 2008) A second area of focus involves the development of a practice model to support the implementation of TQM in an industrial organisation. (Low and Teo, 2004; Elghamrawy and Shibayama, 2008) The next area of increased interest is related to the problems and barriers in the implementation of TQM, which are mainly associated with the presence of administrative and organisational inconsistencies and characteristics. (McIntyre and Kirschenman, 2000; Abdul-Aziz 2002; Low and Teo 2004).

The application of the principles underlying TQM in the sector in question is largely determined by strong competitive relations, unscrupulous management behaviour, and unclear supply chains. The presence of these challenges in the past few years has significantly hindered the possibility of a smooth implementation of the principles and their binding to the accepted organisational culture and behaviour in the market. The TQM approach itself is primarily perceived as a leading

philosophy for managing processes and activities, the orientation of which is to create and use an appropriate model to improve the organisation's competitiveness in a dynamic market environment.

The present study is part of a wider-scope exploration that aims to investigate the relationships between competitiveness improvement, organisational culture, and the principles underlying TQM in aggregates mining. The data thus presented should contribute to the development of opportunities for practical implementation of the approach in a dynamically developing and highly competitive sector of the national economy. Possibilities for future development are related to the creation of a conceptual framework for the application of the total quality management approach, which will improve the applied behavioural and methodological aspects related to known management practices.

## Key elements of the TQM approach

Based on a literature survey on the philosophies, principles, and approaches of various researchers in the field of quality management systems, the authors define six main elements related to the implementation of TQM. These elements are: leadership skills, customer satisfaction, people management,

supplier relationships, process management, and continuous improvement.

Part of the commonly defined goals of the TQM philosophy is to establish quality improvement practices as a clear organisational priority leading to increased organisational effectiveness (Spencer, 1994). The process of ensuring high quality and continuous process improvement begins with the presence of commitment from the top management, as its responsibility is key in creating a competitive organisational infrastructure. The role of senior management is mainly manifested in the presence of leadership skills, commitment, and personal involvement in the implementation of TQM principles. Top management creates values, motivation, and attainable quality-related goals. At the operational level, leadership engagement often involves analysing quality performance and accountability for continuous improvement team leaders. Other responsibilities involve planning updates in goals, emphasising the importance of quality over costs and accepted production schedules, economically providing resources to achieve high quality, and effectively communicating the organisation's intentions when using TQM principles. (Chase, 1993; Delgado-Hernandez and Aspinwall, 2005).

Having a clear focus on customer needs and wishes is a clear sign of an organisation that has adopted TQM as a guiding management philosophy. This focus is often expressed through the production of goods and services that fully satisfy customer requirements. In the mining of aggregates, this is associated with meeting the requirements of the accepted projects in terms of technical specification and customer satisfaction expressed through repeat orders. In addition to this, it also includes maintaining a close relationship with the customer and seeing this approach as key in quality management activities and developing future strategic alliances. At the operational level, TQM envisages the promotion of cooperative working relationships between all participants in the formation of collaborative teams. This implies an emphasis on building future fruitful relations, rather than the formal implementation of agreed clauses between the parties. Customer focus is also associated with good communication and feedback processes regarding possible discrepancies and customer satisfaction. Subsequently, this information can be effectively used for both internal and external benchmarking. Aggregate mining initiatives include delighting our client's customers by establishing proper relationships with end users/users in subsequent phases after mining, and offering differentiated services or solutions for a given client's projects.

The people management element involves building cooperation between managers and other employees, as well as between customers and suppliers. This element is associated with the presence of a systemic approach in an organisation and is based on benefits that can potentially be derived through a clear partnership between different parties. (Dean and Bowen, 1994). People management often involves the participation of employees in quality management processes and decisions related to the improvement of the achieved results and updating of the set goals. This enables the use of cross-functional teams to implement innovations and other technology solutions, as well as to provide feedback on their overall performance. Recruiting and selecting employees based on their ability to work in a team and problem solving skills is another key skill. This is extremely important because TQM is successfully implemented in the presence of a team working

environment and commitment of people to the accepted quality management plan in the organisation. In addition, emphasis is placed on empowering people, encouraging them to improve their work and correct any problems related to the quality and use of the resources provided to them.

The key importance of supplier relationship management activities stems from the fact that organisations compete with each other primarily through the allocation of resources in a supply chain. The presence of mutually beneficial relations between suppliers in a chain is often associated with the presence of the so-called cooperative interdependence (Anderson et al., 1994). These relationships between suppliers are particularly pronounced in the mining of aggregates, where there are a number of subcontractors who participate with different types of arrangements in the execution of a given order. The quality of the final product (facility) is directly dependent on the quality of the resources and activities provided by related suppliers and related market entities. Supplier relationship management involves creating mutually beneficial partnerships that involve evaluating criteria, such as quality, quantity, price, and delivery time. The sector in question relies on a limited number of suppliers or sub-contractors due to the nature of work, which necessitates the development of long-term relationships, mutually beneficial contracts, and a cooperative attitude.

A characteristic feature of process management in the considered sector is the possibility to perceive them as a set of horizontal interconnected operations. The quality of semi-finished or intermediate products/services and that of the finished product/facility depends to a large extent on the processes by which the required resources are processed. Since the presence of an uncontrolled small deviation in the performed processes often causes a large-scale quality problem, it is essential to analyse and control the critical success factors of the activities. Process management involves the application of a process approach that requires quality control measures and continuous monitoring of critical processes. The implementation of internal inspections on accepted projects and their implementation, safety measures, conformity assessment, and the like, are essential to ensure the quality and efficiency of the processes.

The last element considered is associated with the presence of continuous improvements and often includes commitment to constantly research and analyse technological and administrative processes and apply better methods for their implementation. By improving these processes and activities, the organisation is able to successfully meet the growing expectations of customers over time. Continuous improvements aim to improve the reliability and control of the entire production system. The element itself emphasises active learning so that the organisation has the opportunity to continue to develop new knowledge, skills, and abilities. Successful implementation of given improvements requires strong leadership and an appropriate organisational infrastructure. This involves using a distinct technology system that helps identify and study key processes leading to improvements. Also, an effective process control mechanism, progress assessment, ability to analyse cost data, measure overall performance and benchmark.

## **Research design and data collection**

When designing the research, a sample of participants was selected in different departments and with different functions in



the implementation of production and administrative activities. The purpose of the research was to study and analyse good practices related to quality management in the extraction of aggregates. In order to achieve a greater representativeness of the sample in the study, people related to the top management participated as well, since they play a key role in the implementation of the principles related to TQM. Second, the inclusion of people from middle to lower management level provided an opportunity to successfully explore the diffusion of these principles, leading to the formation of an organisational culture leading to continuous improvement.

Based on the frameworks for conducting the study, 25 participants were identified who personally participated in collecting the necessary data. Target respondents included senior management and quality managers who were leaders in implementing quality management systems. In addition, the organisation had all the necessary certificates and standards that were necessary to carry out the activity and include certain elements of TQM.

The created questionnaire consisted of two main parts. The first contained general information about the respondent's position and functions, and the second assessed the extent of TQM implementation. The questions aimed to obtain information on the degree of application of each of the TQM principles, using information from other similar empirical studies (Claver et al., 2002; Kululanga et al., 2002; Low and Tan, 2002). Some of the management systems through total quality were relevant to the sector under consideration and were substantiated by conducting a literature survey. As the literature data presented were largely developed for a real material product production environment, changes were made to reflect the specificities of aggregates extraction. Each item in the questionnaire described an activity that required the respondent to rate the level of current implementation of TQM in terms of "degree of implementation" on a scale of 1 to 5 similar to that proposed by Likert. '1' was 'weakly implemented' and '5' is 'highly implemented'. The time of data collection was from October 2023 until December 2023, with answers from all 25 participants provided.

The summary characteristics of the respondents showed that 31% were senior managers, 40% were project managers, quality managers, etc., and the remaining 29% were employees in various areas of the organisation. For the scope of activities, all employees were involved in more than one process or activity, with more than two-thirds involved in projects related to the main activity and the over half in ancillary activities. As for the certificates, in the short term the organisation acquired the necessary documents to carry out blasting and drilling activities, which suggested that it had a relatively short experience with TQM-like quality management systems.

After statistical processing of the data, the level of TQM implementation ranged from 3.05 to 3.76. The items related to customer satisfaction (3.60) and process management (3.76) and to some extent leadership skills (3.50) apply to a moderate to high degree as fourth degree performance. The management of processes in the organisation is evaluated with the highest degree of implementation, which is in line with the traditionally applied management models adopted by the top management.

The second highest mean score of 3.60 for customer satisfaction should be interpreted as an increasing recognition of a stronger perception of customers as participants in the design and engineering processes. This was due to consistent actions to integrate different stakeholders into separate

processes as mutually beneficial partners in order to improve the overall performance. In addition, the results showed a growing awareness of the opportunities to achieve competitive advantages, for both contractors and clients, from such close cooperation. In this regard, the element related to customer satisfaction (relationships with suppliers, people management and continuous improvement, can be used as a catalyst for the organisation to be more open to different partner initiatives by being involved in a project. That is why TQM as a successful management approach should be seen as a strong motivator for inter-organisational partnership in a supply chain.

The third highest mean score of 3.50, related to the element of leadership skills, was a key indicator, as the leadership and commitment of top management is perceived as a prerequisite for the successful implementation of TQM. The result showed that the people in the organisation recognise to a certain extent the efforts of top management as leaders in implementing principles related to TQM.

## **Tools for the implementation of the elements related to TQM**

### ***Leadership skills***

Tool 1: Build a comprehensive communication strategy and develop a quality improvement policy and detailed plan. This, in turn, includes the successful implementation of clear policies and objectives related to quality assurance. Senior management, heads of departments and projects possess leadership qualities, actively participate in business process improvement activities, and support people in making decisions about TQM principles.

Tool 2: Construct and disseminate quality as a leading element in the overall organisational culture. Promoting such a culture throughout the organisation involves taking a long-term view of improvements. Implementing this understanding among senior and middle managers changes their performance, communication, and involvement in resolving quality issues. Thus, the awareness and motivation of people to actively participate in activities aimed at improving competitiveness is promoted. The main goals here are related to implementing a culture that emphasises on the involvement of people through the personal example of prominent leaders in the organisation.

Tool 3: Perceive quality as a leading objective that is prioritised over production schedules and accepted costs. The use of this tool on the way to TQM is usually associated with a change in people's mentality, which is the basis of the previous two factors (tools). Viewing quality as a key competitive advantage cascades from senior management to day-to-day operational activities. In a similar way, the processes related to the provision of adequate resources to support efforts to improve quality should be carried out.

### ***Customer satisfaction***

Tool 1: Providing opportunities to provide differentiated services to customers according to their individual requirements. Most often, this approach includes a set of services of a different nature that organisations provide to clients in the form of an alternative design or proposal for an individual work project, which leads to a reduction in the costs that the client will continue to carry out. The various services offered by the organisation also include active service of additional customer requirements to the offered quality.

Tool 2: Maintaining good and fruitful customer contacts. This factor for the implementation of the elements of TQM coincides with some of the characteristics described in the previous part. Keeping in close contact with customers means taking the time to study their current and future requirements. In addition, researching customer satisfaction and spreading the word to different people on the project team is part of the way to achieving a long-term relationship.

Tool 3: Provision of additional (indirect) services. Managing customer relationships and taking care of their requirements is often associated with holding informal meetings with people from the customer's team. Most often, these are general events, short trainings, seminars, etc. In addition, indirect service may also take the form of subcontracting services to customer partners. This is often encountered in the implementation of large infrastructure projects, where contractors frequently provide additional services to end users.

### **People management**

Tool 1: Continuous communication and people's involvement in quality improvement processes. Communication issues include promoting awareness, providing feedback and recognition from management to those responsible for achieving quality objectives. In addition, the top management should also take the impact on the high results achieved and the people working in the departments directly involved in quality control and assurance.

Tool 2: Empowering people in the organisation. This includes ensuring that people have the opportunity to inspect their own activities and correct any possible issues in a manner that complies with accepted procedures. To achieve this, senior management must provide the resources that are necessary to adequately address problems. Another way to assess people's empowerment is to use cross-functional teams and encourage the participation of all team members. An additional element covered by this factor is linking human resource management with quality improvement plans. Oftentimes, the responsibility for good people performance is directly linked to a commitment from senior management to provide the appropriate empowerment.

Tool 3: Recruit and select people based on their ability to solve problems. In addition to adequate solutions to problem situations, the selection of employees is also based on his ability to work effectively in a team. The importance of teamwork in aggregates mining is key and is reflected not only in selection based on teamwork ability, but also in motivating people to achieve outstanding performance.

### **Supplier relationships**

Tool 1: Mutually beneficial and long-term relationships with suppliers/subcontractors. This factor mainly covers three problem areas related to TQM. In terms of mutually beneficial relationships, close cooperation is manifested in the involvement of suppliers/subcontractors in the development of mining processes/projects, provision of technical assistance, and clear specifications of delivered products/services. The second issue concerns securing long-term working relationships with suppliers/subcontractors. This element is often applied in practice, especially when several contractors have adopted a strategic partnership with their suppliers/subcontractors to secure future contracts. The third emphasis here is associated with supplier/subcontractor evaluation, which is expressed in strict compliance with accepted quality standards based on a

pre-agreed evaluation system. In general, it is possible to apply circumstantial issues when deciding on a network partnership with a particular customer, but in strict compliance with the adopted policy for continuous improvements of operational processes and activities.

Tool 2: Trusted relationships with a relatively small number of suppliers/subcontractors. Although having a small number of trusted suppliers is a key element in this factor, managers agree that it is key. In practice, the second factor is applied more often; it is associated with an assessment of relations regarding quality, quantity, price, and delivery time. In addition, the collected data show that the assessment also includes the presence of financial stability. In the sector, selection of suppliers/subcontractors based on quality (not price or time) is not often practiced. Similar observations in the sector suggest that contractors rely on fewer suppliers/subcontractors, and their choice still depends significantly on a number of criteria other than quality.

### **Process management**

Tool 1: Continuous quality control of the processes related to the extraction of aggregates. In the first place is the presence of the traditional inspection and verification of the mining processes, both at the intermediate and at the final stages when the mined resources are handed over. This check will lead to the prevention of accidents or incidents in the subsequent operational processes. The second emphasis here is related to the adoption of measures to assess the quality of mining processes. This includes developing a detailed schedule with an emphasis on quality and maintaining safety measures to minimise disruptions to the production processes.

Tool 2: Accepting and providing clear instructions for the processes being carried out. Accurate and comprehensible instructions should be the embodiment of a well-structured and comprehensible directive for methods used, work designs, and inspection and control plan. A working sample is often used here to enforce the requirements of the standards and to demonstrate good manufacturing practices. Directly related to this factor is having a design for safe mining processes so that human error is minimised.

### **Continuous improvements**

Tool 1: Implement models for evaluation and process improvements. Adopting adequate models for process evaluation and improvement leads to future analysis of mining activities in terms of both costs and overall efficiency. Improvement efforts are then formulated based on the expert judgments received. However, while the analysis of performance and cost data is relatively common, other measures are underrepresented in the sector. An additional practice that falls under this factor of moderate importance is the use of a specific organisational structure (e.g., cross-functional teams) to support quality improvement activities.

Tool 2: Conduct external benchmarking. This type of benchmarking involves promoting quality improvement efforts against teams external to the organisation that are direct and/or indirect competitors. Supporting quality improvement with the help of an external team often involves collaboration with resource suppliers/subcontractors. This includes models for improvements compared to direct competitors and their successful practices, often adopted by other contractors. Despite their key importance, these practices are still poorly or moderately applied in the sector under consideration, one of the

reasons being the lack of understanding those and their impact on an organisation's competitiveness.

## TQM implementation model

Based on a literature review and a practical study, the components of an exemplary model for implementing TQM principles in the mining of aggregates were determined. The key prerequisites for effective quality management in a production system are associated with the presence of commitment and leadership skills. Senior management should demonstrate a responsible attitude in defining and communicating the vision, mission, and goals aimed at cooperation with all stakeholders. Appropriately directed, these leadership efforts create a good organisational system for effective process management and continuous improvement.

The created organisational-management system consists of elements, such as managing relationships with customers, people, suppliers and the quality of the products or services offered. The system itself binds internal and external cooperation and cooperation in a common network of communication channels. Internal collaboration is manifested in elements related to people management with an emphasis on involvement and empowerment. External collaboration involves engagement with both customers and suppliers, where good partnerships and alliances are implemented in practice, regardless of formal legal independence and cultural or behavioral barriers that exist among project participants. These elements not only embody TQM as a management system, but are also a powerful catalyst for improving overall performance.

The main production processes in the extraction of aggregates include quality management activities (including assurance and control) and those related to the management of specific individual projects. Therefore, process management focuses on key productions so that they are carried out according to plan or within accepted deviations, despite changes in people, materials and the environment. This is how the management of technological processes inevitably includes motivational aspects oriented towards people, which should lead to an efficient and effective production system.

The implementation of an effective continuous improvement system covers both human resources and the technological solutions used. Active learning is a critical element of TQM and represents the essence of all improvement initiatives and implementation of innovation solutions. The strong relevance of learning lies in the fact that this is how people at all levels continuously increase their knowledge in order to improve their performance, thereby increasing the competitiveness of the organization as a team. The practical application of learning outcomes, i.e. knowledge, leads to continuous improvement. The acquired knowledge is implemented in processes where incremental changes are planned, checked, monitored, and applied appropriately to improve a specific quality indicator.

Targeted and consistent application of TQM principles leads to high efficiency and quality, which in turn generates satisfaction among customers. Achieving high quality should be considered at two levels: organisational and project. Organisational quality encompasses the results of implementing corporate strategies that are manifested in the formulation of production operations, while project quality includes the effective delivery of products and services related to an individual work project. Generating good feedback provides information about the performance of the system and the

relationship between the individual elements in it, which continues in the next cycle of production and improvement.

## Conclusion

The fundamental meaning of TQM should be seen as a philosophy consisting of principles and approaches that can be united in an integrated quality management system. In the course of the research, eight elements have been identified that are paramount to implementing TQM in the mining of aggregates. The research data show that the implementation of the items fluctuates around the average level of the accepted rating scale. However, a careful analysis of the data shows that the elements are implemented with varying degrees of penetration at the mid-level vis-à-vis customers, processes, and senior management. The elements related to suppliers are in a stronger degree of implementation, while those focused on people and continuous improvement are represented to a lower degree.

From a research perspective, a set of practical observations and data analysis have enabled us to identify a small number of key elements of TQM that lead to improved competitiveness in the researched sector. The elements mentioned represent basic principles that organisations can use to begin implementing TQM in aggregates mining. These elements are: leadership, organisational structure, process management, and quality and improvement management. Adopting the mentioned key techniques and embedding them in a conceptual framework for practical application should provide an organisation with the opportunity to gain new competitive advantages.

## Acknowledgments

This study is funded by the European Union-Next Generation EU, through the National Recovery and Resilience Plan of the Republic of Bulgaria, project № BG-RRP-2.004-0002, "BiOrgaMCT".

## References

- Abdul-Aziz, A.R. (2002). "The realities of applying total quality management in the construction industry." *Strucl. Surv.*, 20(2), 88-96.
- Anderson, J.C., Rungtusanathan, M., Schroeder, R.G. (1994). "A theory of quality management underlying the Deming management method." *Acad. Manage. Rev.*, 19(3), 472-509.
- Chase, G.W. (1993). "Effective total quality management (TQM) process for construction." *J. Manage. Eng.*, 9(4), 433-443.
- Claver, E., Tari, J.J., Molina, F. (2002). "Areas of improvement in certified firms advancing towards TQM." *Int. J. Qual. Reliab. Manage.*, 19(8/9), 1014-1036.
- Dean, J.W.Jr., Bowen, D.E. (1994). "Management theory and total quality: Improving research and practice through theory development." *Acad. Manage. Rev.*, 19(3), 392-418.
- Delgado-Hernandez, D.J., Aspinwall, E. (2005). "Improvement tools in the UK construction industry." *Constr. Manage. Econom.*, 23(9), 965-977.
- Elghamrawy, T., Shibayama, T. (2008). "Total quality management implementation in the Egyptian construction industry." *J. Manage. Eng.*, 24(3), 156-161.
- Koh, T.Y., Low, S.P. (2008). "Organizational culture and TQM implementation in construction firms in Singapore." *Constr. Manage. Econom.*, 26(3), 237-248.

Kululanga, G.K., Price, A.D.F., McCaffer, R. (2002). “Empirical investigation of construction contractors’ organizational learning.” *J. Constr. Eng. Manage.*, 128(5), 385-391.

Low, S.P., Tan, S.L.G. (2002). “Relationship marketing: A survey of QS firms in Singapore.” *Constr. Manage. Econom.*, 20(8), 707-721.

Low, S.P., Teo, J.A. (2004). “Implementing Total Quality Management in construction firms.” *J. Manage. Eng.*, 20(1), 8-15.

McIntyre, C., Kirschenman, M. (2000). “Survey of TQM in construction industry in Upper Midwest.” *J. Manage. Eng.*, 16(5), 67-70.

Spencer, B.A. (1994). “Models of organization and Total Quality Management: A comparison and critical evaluation.” *Acad. Manage. Rev.*, 19(3), 446-471.

## USING PROJECT-BASED-LEARNING IN TEACHING TRANSLATION SKILLS TO ENGINEERING STUDENTS

*Galina Koteva*

*University of Chemical Technology and Metallurgy, 1700 Sofia; E-mail: kotevag@uctm.edu*

**ABSTRACT.** The aim of the course of specialised translation taught to the engineering students at the University of Chemical Technology and Metallurgy (UCTM) is to equip them with the necessary skills so that they can work as professionals autonomously. A good way to familiarise students with the peculiarities of written scientific and technical discourse is through project-based learning (PBL). A major advantage of this method of learning is the so called “learning by doing” which accounts for gaining real practical experience, as well as learning how to work autonomously and in a team. Using the PBL method in teaching translation competence to engineering students helps them reflect on the translation process itself, as well as gives them the opportunity to work autonomously and in a team in order to develop communication, organisation, and team–decision skills.

**Key words:** project-based learning, specialised translation, self-assessment.

### ИЗПОЛЗВАНЕ НА ПРОЕКТНО-БАЗИРАНО-ОБУЧЕНИЕ ЗА ИЗГРАЖДАНЕТО НА ПРЕВОДАЧЕСКИ УМЕНИЯ У СТУДЕНТИ ПО ИНЖЕНЕРНИ ДИСЦИПЛИНИ

*Галина Котева*

*Химикотехнологичен и металургичен университет, 1700 София*

**РЕЗЮМЕ.** Целта на курса по специализиран превод, преподаван на студенти по инженерни дисциплини в Химикотехнологичен и металургичен университет (ХТМУ), е да изгради у тях необходимите умения, така че да могат да работят автономно като професионалисти. Един добър начин за запознаване на студентите с особеностите на писмения научен и технически дискурс е чрез проектно-базираното обучение. Основно предимство на този начин на учене е така нареченото „учене чрез правене“, което способства за придобиването на реален практически опит, както и научаването на самостоятелна работа и работа в екип. Използването на метода на проектно-базирано обучение при преподаване на преводаческа компетентност на студенти в инженерните специалности им помага както да анализират самия процес на превод, така и им дава възможност да работят автономно и в екип, за да развият умения за комуникация, организация и екипно вземане на решения.

**Ключови думи:** проектно-базирано обучение, специализиран превод, самооценка.

### Introduction

Project-Based Learning (PBL) is a student-centered educational approach that transforms learning by actively engaging students in real-world problem-solving. Unlike traditional methods, PBL encourages students to take charge of their education and tackle meaningful issues collaboratively. Students embark on a journey of inquiry and investigation, conducting research, analysing data, and exploring diverse perspectives to understand problems deeply. Collaboration is a key aspect of PBL, fostering teamwork, effective communication, and empathy.

Through hands-on projects, students develop critical thinking, creativity, and problem-solving skills, taking ownership of their learning. Presenting their work to an audience reinforces learning and cultivates skills like critical thinking and communication. Ultimately, PBL prepares students for success in academia and beyond by equipping them with essential skills and fostering a life-long love of learning.

Key principles of PBL include (Thomas, 2000):

- Authenticity: Projects should be grounded in real-world problems or challenges, making learning relevant and meaningful (Kiraly, 2005; Hurtado-Albir, 2007).
- Inquiry: Students should actively investigate questions, gather information, and make connections between concepts.
- Collaboration: Working in teams allows students to learn from each other, develop social skills, and experience the benefits of diverse perspectives.

- Reflection: Regular opportunities for reflection help students think critically about their learning process, identify strengths and weaknesses, and set goals for improvement.

- Student Agency: PBL empowers students to take ownership of their learning, fostering independence, motivation, and a sense of responsibility (Margetson, 1997).

What makes PBL a powerful educational approach is that it prepares students for the challenges of the real world by equipping them with essential skills and knowledge (Finkel, 2013). Implementing PBL effectively requires careful planning and support (Hurtado-Albir, 2007). Teachers design projects that align with learning objectives and provide scaffolding to support students throughout the process. Technology can also play a valuable role in PBL, facilitating research, collaboration, and presentation of findings.

A vital feature of PBL is the so called scaffolding which is like building a structure to support learning. It is the idea that, when students are learning something new, they rely on their previous knowledge and experiences as a foundation (Alaoui, 2015). This previous knowledge acts as the scaffold, providing support for them to construct new understandings.

Moreover, scaffolding suggests that students learn most effectively when they are actively engaged in the learning process, rather than simply being told information. This active engagement allows them to explore, discover, and make connections, which leads to deeper understanding and retention of knowledge (Ellis, 1997). Thus, PBL advocates learning by doing, providing support and guidance to build understanding gradually, fostering a supportive environment tailored to individual competencies (Alaoui, 2015).



## **Translation of authentic documents: objectives**

Specialised translation involves the translation of texts that require subject matter expertise in specific fields, such as medicine, law, engineering, finance, or technology. Unlike general translation, which deals with more common topics, specialised translation demands a deep understanding of the terminology (Newmark, 1988), concepts, and conventions unique to the field being translated.

The objectives behind translating real scientific-technical documents are the following (Orozco-Jutoran & Hurtado-Albir, 2002; Kiraly, 2005; Pop, 2017):

1) To encourage students to take an active role in their learning by prompting them to think about how they translate, what resources they utilise, the time they dedicate, and the outcomes they achieve;

2) to acquaint students with both independent work and collaborative efforts, wherein they hone their communication, organisation, and teamwork abilities;

3) to create connections between the subject matter and other disciplines within the undergraduate program, such as chemistry, computer science, information science, and terminology.

Specialised translation by engineering students can offer several benefits, both in terms of language proficiency (Alaoui, 2015) and subject matter expertise (Pop, 2017). Here is how it can be advantageous:

**1. Deepens technical understanding:** Translating engineering texts requires a strong grasp of technical concepts and terminology. Engaging in specialised translation tasks can deepen engineering students' understanding of their field by exposing them to technical content in both their native and target languages.

**2. Enhances language skills:** Specialised translation challenges students to master technical vocabulary and complex language structures specific to engineering. This process strengthens their language skills in both languages, particularly in areas, such as precision, clarity, and academic writing style.

**3. Prepares students for their future career:** Engineering students who develop proficiency in specialised translation can gain a competitive edge in the job market. Many engineering firms operate globally and require employees who can effectively communicate technical information across language barriers. Experience in specialised translation can enhance students' CVs and broaden their career prospects.

**4. Helps cross-cultural communication:** Engineering is a global profession, with collaboration often spanning multiple countries and cultures. Through specialised translation, students not only learn technical content but also gain insights into how engineering concepts are expressed and understood in different cultural contexts. This fosters cross-cultural communication skills, which are valuable in today's interconnected world.

**5. Contributes for exchange of knowledge:** Specialised translation by engineering students can facilitate the dissemination of engineering knowledge across linguistic boundaries. By translating technical documents, research papers, or instructional materials, students contribute to the exchange of ideas and innovations within the global engineering community.

**6. Fosters interdisciplinary learning:** Translating engineering texts may require interdisciplinary knowledge, as

technical topics often intersect with other fields, such as physics, mathematics, or computer science. This interdisciplinary approach broadens students' understanding and encourages them to make connections between different areas of knowledge.

However, it is important for engineering students to receive adequate training and guidance in translation techniques, terminology research, and cultural sensitivity to ensure the accuracy and quality of their translations (Hurtado-Albir, 2007; Pop, 2017). Additionally, they should continue to develop their engineering skills alongside their language abilities to excel in both areas.

## **Mastering translation competence**

Translation competence refers to the knowledge, skills, and abilities required to effectively translate text from one language to another while accurately conveying the meaning, style, and nuances of the original content. This includes linguistic proficiency in both the source and target languages, cultural understanding, subject matter expertise, as well as proficiency in translation techniques and technologies (Orozco-Jutoran & Hurtado-Albir, 2002; Alaoui, 2015; Pop, 2017).

As Kiraly (2005) points out, translation competence emerges as a result of completion of authentic translation work and in the praxis of authentic translation work, students can acquire a privileged view of the nature of the translation process which is not a mere transcoding of texts but a creative and experience-bound construction process which requires taking the “right” solutions.

The focal points behind practicing scientific-technical translation by the engineering students are, on the one hand, the authentic practice which is working on real translation projects, such as translating descriptions of equipment, safety instructions, technical specifications, user manuals, websites, etc. The acquired knowledge and skills have to be meaningful for the student which provides the opportunity for interdisciplinary learning where the students have to incorporate the contents of other subjects into constructing their own knowledge.

On the other hand, building terminological bases, also known as glossaries or terminology databases, may be a crucial aspect of specialised translation. These databases contain a comprehensive list of terms and their corresponding translations in one or more languages, along with relevant contextual information. Terminology databases can greatly enhance language acquisition in several ways:

- Language learners often need to acquire specialised vocabulary related to their field of study or profession. Terminology databases provide a centralised resource for accessing this specialised vocabulary, making it easier for learners to find and understand terms specific to their area/s of interest.

- Many terminology databases include contextual information, such as definitions, usage examples, and translations. This contextual information helps learners understand how terms are used in real-world situations, improving their overall comprehension and language proficiency (Ellis, 1997).

- Terminology databases often support multiple languages, allowing learners to access translations and explanations in their native language. This multilingual support can be especially

beneficial for learners who are not yet fluent in the language they are studying.

- Some terminology databases offer interactive features such as quizzes, exercises, and multimedia resources. These interactive elements engage learners in active learning experiences, helping them retain information more effectively (Alaoui, 2015).

- Advanced terminology databases may offer customisation and personalisation options, allowing learners to tailor their learning experience to their individual needs and preferences.

Overall, specialised translation and term base building are interconnected processes that require expertise, attention to detail, and a commitment to delivering high-quality translations.

## Methodology

The learning experience described here is related to my group of chemical engineering students at the University of Chemical Technology and Metallurgy (UCTM) who study a two-semester course of specialised English in their second year. The project work which was done in the students' second semester of study included three stages: stage of planning, dividing in groups, and assigning tasks; stage of translation; and stage of assessment.

The first stage was crucial because the students' success relied on their thorough understanding of the objectives they needed to achieve, comprehending the project methodology, and recognising the potential benefits they could gain from it. They were given the criteria for working on the project, as well as the deadline and the final assessment method. Then, students were divided into four groups of three and each student obtained an equal share of the whole document. The documents to translate were not chosen at random, but together with a colleague teacher of the chemical technology department. So, the students were aware that their work would be useful for their other studies as well. Then the students were assigned the following tasks:

### 1. *Looking for Parallel Texts:*

o **Requirement:** This task involves searching for existing translations of similar texts in the target language. These parallel texts serve as reference materials for students, providing insights into how certain phrases or terms have been translated previously.

o **Skills Needed:** Effective searching skills to locate relevant parallel texts, critical thinking to evaluate the quality and suitability of the found translations, and the ability to adapt and apply insights from parallel texts to the current translation context.

o **Approach:** Students may utilise various resources, such as translation memory databases, online repositories, published translations, and professional networks to find parallel texts.

### 2. *Searching for Terminology:*

o **Requirement:** Students need to research and identify accurate translations for specialised terminology and jargon used in the source text.

o **Skills Needed:** Strong research skills to locate authoritative sources, such as technical dictionaries, glossaries, industry standards, and online provided materials. Additionally,

critical thinking skills are necessary to evaluate the relevance and reliability of terminology sources.

o **Approach:** Students employ a systematic approach to terminology research, utilising both online and offline resources to ensure the accuracy and consistency of translated terminology. They may also consult subject matter experts or teachers for clarification on specific terms.

### 3. *Translating:*

o **Requirement:** Students must accurately convey the meaning and intent of the source text in the target language while considering linguistic, cultural, and contextual nuances.

o **Skills Needed:** Proficiency in both the source and target languages, deep understanding of the subject matter, strong writing skills, and cultural sensitivity. Additionally, the ability to maintain consistency in terminology and style throughout the translation is essential.

o **Approach:** Students employ various translation strategies, such as literal translation, paraphrasing, cultural adaptation, and localisation to ensure the fidelity and readability of the translated text. They may also use translation software tools and reference materials to aid the translation process.

### 4. *Proofreading:*

o **Requirement:** Proofreading involves reviewing the translated text to identify and correct errors in grammar, syntax, punctuation, spelling, and formatting.

o **Skills Needed:** Keen attention to detail, strong language proficiency in both the source and target languages, and familiarity with grammar and style conventions. Critical thinking skills are also necessary to identify and rectify inconsistencies or inaccuracies in the translated text.

o **Approach:** Proofreading is typically conducted after the initial translation to ensure the accuracy and quality of the final product. Students may use spelling and grammar checkers, style guides, and peer review to facilitate the proofreading process.

For stage two, blended learning approach (Finkel, 2013; Krumova et al., 2020) was used: This refers to an instructional method that integrates different modes of learning, such as in-person instruction and online learning, to create a more flexible and personalised learning experience. It means students did some tasks in class and others on their own, especially those requiring independent work and writing. Outside the class, students used e-mails, chat forums, document-sharing environments to keep in touch. Some class time was spent to let groups meet and discuss any problems and a whole class session was provided after the completion of the projects to let each group give a class presentation stating the procedures they had followed and the problems they had to overcome both related to translation and those related to teamwork.

An important issue of the problem-solving learning through technical text translation tasks is handing in the ready translations by a certain deadline. In our case, the deadline was in six weeks' time because the project was not aimed for the whole semester. When the students began the project, they established a timetable outlining the specific documents they needed to submit by the assigned deadline. These included a compilation of the parallel texts together with an explanation why these were important, as well as a glossary with the extracted terms and a self-evaluation report (see Appendix 1) commenting on the problems they had to solve during the project work.

The final stage was the assessment of the submitted translations but the focus here was not so much on the product of the translation process but rather on the whole learning experience which included active participation in all the stages of the translation process, as well as the teamwork done. So, this approach allows for ongoing evaluation (Palmer & Hall, 2001) of students' skills and progress throughout the project, fostering a dynamic learning environment where feedback can be provided and improvements can be made incrementally.

## Results

All in all, students highly appreciate the chance to translate authentic documents because thus they stay close to their professionally oriented interests and feel their practice is beneficial for their studies. Of course, there may be some negative aspects, such as lack of experience in working in groups which can be a great challenge for the students (Margetson, 1997). They must be made aware that the success of the group depends on each of them and working individually is not well tolerated, nor is relying too much on the efforts of other members of the group. Students generally liked this learning-by-doing approach to the studied material and felt pleased with the results. Moreover, independently working without the teacher's guidance cultivates individuals who are self-reliant and capable of working with greater efficiency. Another issue may be the big overload for the teacher who needs to check and assess all the submitted materials.

On the other hand, PBL provides an avenue for teachers to not only track the outcomes of student projects but also to closely observe and assess the students' learning journey (Thomas, 2000; Krumova et al., 2020). Through PBL, teachers can continuously monitor how students engage with the material, their problem-solving approaches, their collaboration skills, and their ability to apply knowledge in real-world contexts. This holistic observation enables educators to gain insights into students' evolving understanding, identify areas where they may need additional support, and tailor instruction to meet individual or group needs effectively. In essence, PBL offers teachers a comprehensive view of students' learning progress, beyond just the final project deliverables.

## Conclusion

Overall, PBL empowers teachers to take an active role in monitoring and supporting of students' learning progress throughout the problem-solving process. By providing ongoing assessment, feedback, and guidance, teachers can ensure that students not only achieve academic objectives but also develop essential skills and competencies for lifelong learning.

In the PBL approach, students are deeply engaged and show increased dedication because they grapple with real-world issues and are responsible for organising and overseeing their learning tasks. Additionally, they are required to articulate and defend their ideas to peers, fostering deeper comprehension and engagement. Hence, PBL is a powerful educational approach that fosters deep learning, critical thinking, collaboration, and student engagement. By immersing students in authentic, real-world experiences, PBL prepares them for success in an increasingly complex and dynamic world.

## References

- Alaoui, A. (2015) Knowledge Transfer and the Translation of Technical Texts, *International Journal of Humanities and Social Sciences*, vol. 9(10)
- Ellis, R. (1997) *Second Language Acquisition*, Oxford, Oxford University Press
- Finkel, A. (2013) Innovative engineering approaches in education, presented at CAETS 2013, Budapest
- Hurtado-Albir, A. (2007) Competence-based curriculum design for training translators. *The Interpreter and Translator Trainer*, 1(2)
- Kiraly, D. (2005) Project-Based Learning: A Case for Situated Translation, *Meta Translators' Journal* 50(4), DOI: 10.7202/012063ar
- Krumova, V, Danalev, D., Terzieva, S. (2020) Project Based Learning – Strategy for professional competence development in higher education, *Science, Engineering and Education*, 5 (1)
- Margetson, D. (1997) Why is Problem-based Learning a Challenge? In D. Boud & G. Feletti (Eds.), *The Challenge of Problem-based Learning* (2nd ed.), London, Kogan Page, 36-44
- Newmark, P. (1988) *A Textbook of Translation*. New York: Prentice Hall
- Orozco-Jutoran, M.; Hurtado Albir, A. (2002) Measuring Translation Competence Acquisition, *Meta* 47(3), 375-402
- Palmer, S. & Hall, W. (2011) An evaluation of a project-based learning initiative in engineering education, *Eur. J. Eng. Edu.*, 36(4), 357-365
- Pop. M. (2017) Technical translation teaching and learning at initiation level: Methodological considerations. *New Trends and Issues Proceedings on Humanities and Social Sciences* [Online]. 4(1), 291-296. Available from: [www.prosoc.eu](http://www.prosoc.eu)
- Thomas, J. W. (2000) A Review of research on Project Based Learning. Retrieved in 2024 from [https://tecfa.unige.ch/proj/eteach-net/Thomas\\_researchreview\\_PBL.pdf](https://tecfa.unige.ch/proj/eteach-net/Thomas_researchreview_PBL.pdf)

## Appendix 1

### Self-assessment questionnaire

1. Did you find working on a project-based translation beneficial for you?
2. Do you think translating authentic documents can be beneficial for your studies?
3. What is the function of the text you have translated?
4. Did you try to identify the main idea of the text before you began to translate?
5. Did you read the whole text through before you started to translate?
6. Which dictionary did you use most frequently?
7. Did this dictionary answer all your questions?
8. What are the major translation problems you encountered during your work?
9. Do you think you have solved the problem?
10. Do you find it difficult to find parallel texts that will help you resolve translation problems?
11. Do you find it difficult to analyse parallel texts that will help you resolve translation problems?
12. Do you find it difficult to resolve terminology problems?

13. Did you read the whole text of the translation before you submitted it?

14. Did you verify that your translation is lexically and terminologically correct before submitting it?

15. Qualify the text you have translated from one to ten on a scale of difficulty?

16. Was it hard to work with your fellow students?

17. Do you value the contributions of your fellow students?

18. Did you manage to keep the time limits?

19. Did you attend to all the meetings?

20. Did you get help from your fellow students?

## ABSTRACT – INTRODUCTION TO THE ACADEMIC GENRE

Milena Purvanova<sup>1</sup>, Perihan Yusein<sup>2</sup>

<sup>1</sup>University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: Purvanova@mgu.bg

<sup>2</sup>University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski” - Kardzhali Branch; E-mail: perihan.yusein@abv.bg

**ABSTRACT.** The article presents a method of work on abstracts with students in the engineering courses of study. It is applied to students at the University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski” in the module in English for Special Purposes (ESP) on the curriculum in Foreign Language Teaching. The objective of the activities offered is for students to conceive the notion of “abstract” within the academic genres, to understand and learn the principles of constructing such a summarising text, and using a guidance algorithm, to be able to produce an abstract on a training scientific text. The focus is on tasks on reading for comprehension, term recognition and production. Work is also targeted at stylistics and visualisation. The implementation of the tasks includes preparatory work in the Internet environment, independent work with a text and an English dictionary/ a dictionary of terms, revising grammar materials. Errors and difficulties are analysed. Examples to follow are given to facilitate student work on the issue. The applicability of the activity is discussed.

**Key words:** ESP, abstract, method, language competences, terms.

### АБСТРАКТ – ВЪВЕДЕНИЕ В ЖАНРА

Милена Първанова<sup>1</sup>, Перихан Юсеин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София

<sup>2</sup>Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“ - Филиал Кърджали

**РЕЗЮМЕ.** Статията представя методика на работа със студенти от инженерни специалности по писане на абстракт. Тя се прилага за студенти от МГУ „Св. Иван Рилски“ в модула по „Специализиран английски език“, включен в учебната програма по чуждоезиково обучение. Целта на предложените дейности е студентите да осмислят понятието „абстракт“ в рамките на академичните жанрове, да разберат и научат принципите на конструиране на такъв резюмиращ текст и, използвайки насочващ алгоритъм, да могат да съставят абстракт върху учебен научен текст. Акцентът е върху задачи за четене с разбиране, разпознаване и производство на термини. Работи се и по стилистика и визуализация. Изпълнението на задачите включва подготвителна работа в среда Интернет, самостоятелна работа с текст и речник по английски език/ терминологичен речник, преговорни граматически материали. Анализират се грешки и затруднения. Дават се помощни примери за работа на студентите по темата. Обсъжда се приложимостта на дейностите.

**Ключови думи:** специализиран английски език, абстракт, методика, езикови компетенции, терминология.

### Introduction

Our combined work touches on two fields of foreign language training: the methods of ESP training and the acquisition of language competences.

Currently, a larger part of means of scientific facts and engineering knowledge is conveyed through printed matter, like monographs, specialised books and manuals, scientific compendiums, journals, company materials, industrial and institutional documentation, etc. or online sources, such as magazines, research sites, conference proceedings and likewise. Publications on how to teach students perceive a scientific text on the lexical level, i.e. on the level of terms, and how terminological competences can be enhanced abound in literature, including the most recent articles of ours (Yusein, 2018; Purvanova, 2023). Here, we focus on the challenging task of offering students insights into perceiving an overall text and extracting the main points in it. Thus, as contemporary foreign language teachers, we are responsible for forming the necessary language competences in engineering students on the semantic and overall conceptual levels, so that the students could comprehend an author's ideas, feel confident with the new information, gain crucial skills in working with technical texts and information sources, and ultimately, be guaranteed quality participation and professional communication in specialist environments, like producing research articles and participating in scientific forums, conferences, symposia, etc.

### Objective

The objective of the activities offered for class work is for students to produce a properly laid-out abstract on a text. The focus is on tasks on reading for comprehension, extracting notions, term production, text production.

### Methods

#### Target group

The activities are directed to students trained in English in the module in English for special purposes (ESP) in the second, third and fourth year within the courses of studies in *Computer Technology in Engineering* and in *Geology and Geoinformatics* in the Bachelor's degree at the University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”. Alternatively, group level permitting, first-year students in higher-level groups may also be trained in abstract production.

#### Algorithm of work

To fulfil the training activities, the following steps are followed that comprise:

- preparatory work within the Internet medium;
- individual work with a general English dictionary and a dictionary of terms;
- text reading;
- comprehension and oral expression of the essence/main ideas in paragraphs/sections of the training text;
- revision of the Passive voice;



- guided writing of an academic text: an abstract.

During and after the performance of tasks, we have also considered including an analysis of possible difficulties and errors.

### Activities

**I. Preparation.** We prepare the classes offered by putting an accent on the **activity “Work in the Internet environment”** and practicing one of the four skills in foreign language teaching: reading. Students are offered a single one or a selection of articles in English available on the Internet, preferably by authors they are familiar with, e.g. their lecturers. These materials may be accessed at home through a link shared, or displayed via multimedia, or simply printed and handed out. Students are trained to outline the elements of an academic article.

**II.** Logically, the **stage of initial explanations** ensues. Students are offered explanations about the objectives of the task. Students are engaged in the **activities “Term introduction”** and **“Dictionary work”**. The notion of “abstract” is introduced.

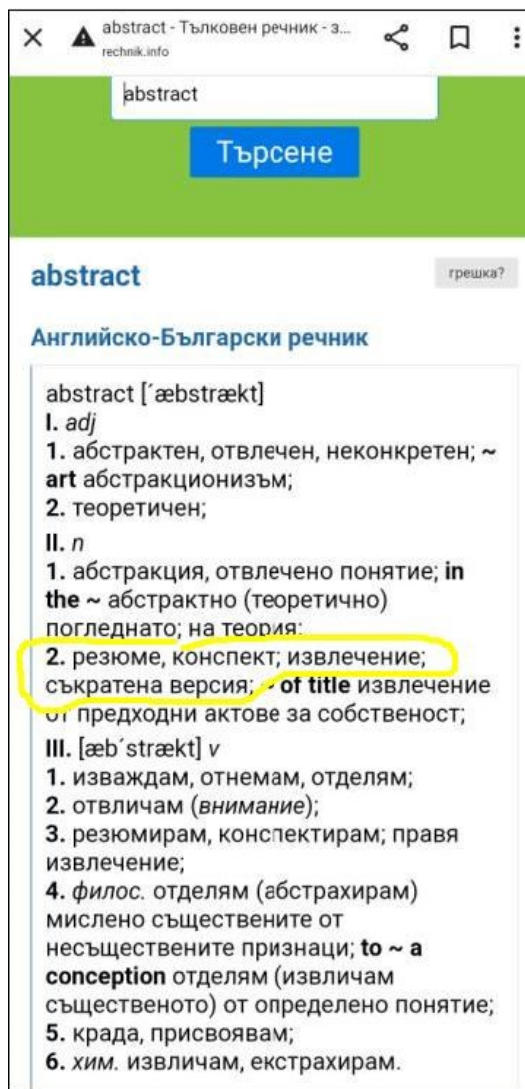
A lecturer is free to organise term presentation in their own manner. We hereby offer just one of many practical ways:

A fairly simple instruction for writing a research paper is read by the students, available at: Website of the UMG at → Science → International Scientific Conference → Paper Formatting Instructions → Paper Guidelines. It says:

“An abstract in English, not longer than 300 words. The abstract should be focused on the most important issues, discussed in the paper. The authors should clearly explain the contents of the work...” (<https://www.mgu.bg>).

For the novice in academic writing, this definition is not really very informative. Therefore, students may be asked to browse for an explanation of the term “abstract” and work individually or in groups and compare their understanding. We enclose the two definitions in the very first sources which the cache offers: “An abstract is a brief summary of a research article, thesis, review, conference proceeding, or any in-depth analysis of a particular subject and is often used to help the reader quickly ascertain the paper’s purpose” ([https://en.wikipedia.org/wiki/Abstract\\_\(summary\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Abstract_(summary))). Here is another one, by St. Kerpedzhiev (2013: 64): “The ABSTRACT contains in a concise form the specific features of the study - the subject, the methods used, the main results and conclusions. Since the summary is one of those items that are also distributed independently of the main text through secondary information publications, it should not contain quotations. Besides, it is not recommended to use equations, tables or other similar means in it. The use of sentences from the body text of the article is allowed. The length of an abstract is usually around 200-300 words.”

If such explanations are insufficient, a more dictionary approach is resorted to: students check up the possible dictionary definitions to the term “abstract”. Here is what the online English-Bulgarian “Dictionary of the Words in the Bulgarian Language” suggests for the noun (<http://rechnik.info/abstract/>):



**III. The assignment.** A material is handed out to the students with exercises and steps to follow. This may either be printed out (strongly advised) or presented via multimedia. A short text about computers is also distributed.

Work on the computer text begins with the standard grammar revision and term recognition exercises. The activities and procedures observed are as follows:

- Exercise 1 (grammar recognition)** - Circle the passives in the text
- Exercise 2 (term recognition)** - Circle the computer terms in the text. They may be nouns, or adjectives, or verbs. Memorise their meaning.

Then, a step-by-step explanation is given for the summarising activity. It is in the form of an algorithm to read with a number of examples. The steps to follow include:

- outlining the main idea in each of the paragraphs in the computer text in one word possibly;
- constructing summarising sentences by:
  - listing the order of ideas in the paragraphs;
  - adding verbs to the list of ideas/paragraphs;
  - finishing the sentences with the summarising words;
- varying the patterns followed;

- adding an introductory sentence in the beginning of the abstract.

### Exercise 3 (summarising) – Follow these steps:

**Step 1** - Try to outline the main idea in each of the paragraphs in the computer text in one word possibly - we usually use nouns for them, such as a definition, a list, a classification, a discussion, methods, etc. (и т.н.) There may be paragraphs with 2 or more ideas in them.

If we have the text nearby printed, we usually write the summarising word next to each paragraph to avoid forgetting ideas, e.g. (нарп.)

§1 – **list**

§2 – **definition**

§3 –

§4 –

etc.

**Step 2** - Now begin constructing summarising sentences. Use a sentence for each paragraph in the text. Following the order of paragraphs, list them using numerals, like:

The **first** paragraph

The **second** paragraph

The **third** paragraph

The words in italics are called markers of listings and they give the logic of your text.

But it gets boring, especially when there are 10 or more paragraphs or more pages.

So, you continue the list of paragraphs with:

The **next** paragraph

**Then**, the text/the article

**After that**, the text

**Further**,

Until you come to the long-awaited

The **last** part of the text 😊😊😊

**Step 3** – Add verbs to your list of paragraphs, e.g.:

The **first** paragraph **presents**

The **second** paragraph **offers**

etc.

**Step 4** – Finish your sentences with the summarising words which you marked beside each of the paragraphs in the text (see Step 1 above), e.g.:

The **first** paragraph **presents** a list of .....

The **second** paragraph **offers** a definition of .....

etc.

**Step 5** – See if your summary sounds interesting. Often, it may be boring because you used the same structures in each sentence.

Vary the patterns you followed, change verbs, change the markers of listings you used throughout the sentences.

Here is an example of listing using verbs, not numerals:

The text **begins** with a list of .....

The text **continues with/proceeds with** a definition of .....

The text **finishes/ends/concludes with** a list of 7 methods of

.....

You may also combine summarising sentences from different patterns; thus, you hold the readers' attention, your summary sounds intriguing, and last but not least, your audience does not fall into deep slumber until they finish reading your summary 😊

**IV. The stage of the initial implementation of the assignment.** Students are asked to produce a very simple abstract following the above steps. They are involved in the activity “Guided writing”.

**Exercise 4 (writing an abstract)** – And now it is your turn to try your hand on summarising the ideas in the attached short text.

As many variants of the assignment fulfilled by students are then read aloud as possible. The didactic objective is to help students memorise the patterns used.

**V. The stage of the task implementation analysis.**

Possible errors are discussed and corrected. When analysing the work at this stage, it is obligatory to give instructions regarding the correct sequencing of the summarising sentences: they are arranged according to their order in the author's text. Another issue is the use of the Passive Voice to render emphasis on the impersonal action, not on who performs it. Punctuation (i.e. commas) after logical markers of sequencing should also be considered since it is part of the stylistics of the scientific text generated.

**VI. The stage of the final implementation of the task.**

Students are asked to re-write their abstracts correctly.

To consolidate the new knowledge acquired, they may be given a longer text on the same topic and assigned to produce an abstract to it for homework.

### Results achieved

The implementation of the activities on the tasks assigned can be beneficial in many respects.

- Introducing students to the elements of a research article/scientific text;
- Introducing students to the notion of abstract;
- Introducing students to the abstract as an academic genre;
- Acquisition of skills on the part of students to summarise an author's ideas expressed in a paragraph/section of a text;
- Creating conditions for a guided written academic discourse;
- Creating conditions for a correct and efficient independent written academic discourse;
- Improved skills when working with academic information;
- Improving students' communication skills;
- Students broaden their knowledge related to the production of academic texts.

### **Applicability**

- Similar summarising tasks can initially be performed with every text covered in class in order to help memorise the algorithm or vary it.
- Further, abstracts can be generated on a regular basis to ensure the longevity of the knowledge offered.
- Besides, this approach results in transforming knowledge into to a linguistic competence.
- Thus, student performance is enhanced and communication skills manifested and upgraded.
- The activities can also be addressed to students trained in English in the third semester within the “streamed” language groups.
- With the necessary language alterations, the algorithm can be employed by language teachers of other languages offered at this educational institution.
- The algorithm is also applicable in the master’s degree and with Ph.D. students;
- And last but not least, it can be a useful tool in distance learning.

### **Conclusion**

In this article, a method of practical work with engineering students in the Bachelor’s degree students at the University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski” is offered. The objective of introducing the notion of “abstract” in the context of academic writing is achieved. The aim of explaining the principles of constructing this particular type of summarising text known as an abstract is fulfilled through an algorithm supported by numerous examples. Guided writing is suggested in class and consolidating writing along the pattern offered is applied for

homework.

The regular application of the algorithm is strongly recommended for improving students’ understanding and summarising of scientific information, enhancing the style of their academic discourse, and upgrading their linguistic competences

The authors’ team expresses their hope that, from the educational point of view and applicability, the method will contribute to students’ future occupational development and the increase in their competitiveness in the long run.

### **References**

- Керпеджиев, С. (2013). Преди на напишем първата си статия. *Електронно сп. „Педагогически форум“*, год I, бр.2, 63-70. Достъпно от: <https://dipkusz-forum.net/article/WjG/predi-na-napishem-prvata-si-statiya>
- Първанова, М. (2023). Теория и практика на превода: суфиксът – LIKE в примери от английския език. *Известия по хуманитарни и социални науки на МГУ „Св. Иван Рилски“ – София*, 3 (XXIII)/2023, 70-85. <http://hdl.handle.net/20.500.12641/55910>
- Речник на думите в българския език. <http://rechnik.info/abstract>
- Yusein, P., Purvanova, M. (2018). Difficulties in Teaching English for Special Purposes to Engineers as a Foreign Language, *Journal of Mining and Geological Sciences*, Part IV, Vol. 61, 2018, p. 54-59. <https://www.mgu.bg>
- [https://en.wikipedia.org/wiki/Abstract\\_\(summary\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Abstract_(summary))

## THE IMPORTANCE OF ENTREPRENEURIAL AND GREEN COMPETENCE IN INDUSTRY 5.0

*Boryana Trifonova, Borislava Galabova, Antonio Charchelanov, Yavor Yonkov*

*University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia  
Corresponding author: boryana.trifonova@mgu.bg*

**ABSTRACT.** Industry 5.0 is characterised by a change in the thinking and concept of the business in relation to the workforce. The focus is on investing in human resources and, specifically, on renewing competences. Not just any competences, but those needed for the future green transition, sustainability, and entrepreneurial activity. This necessitates assessing the importance of entrepreneurial and green competence in light of Industry 5.0's changing requirements and realities. The purpose of the report is to examine the attitudes of future personnel regarding the role of these competencies in moving from education to employment and career development. The conclusions of the study enable the formulation of fundamental suggestions for integrating these competences into an entrepreneurial model.

**Key words:** entrepreneurial competence, green competence, Industry 5.0, entrepreneurial model, sustainability

### ЗНАЧЕНИЕ НА ПРЕДПРИЕМАЧЕСКАТА И ЗЕЛЕНА КОМПЕТЕНТНОСТ В ИНДУСТРИЯ 5.0

*Боряна Трифонова, Борислава Гълъбова, Антонио Черчеланов, Явор Йонков  
Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София*

**РЕЗЮМЕ.** Индустрия 5.0 се характеризира с промяна в мисленето и концепцията на бизнеса по отношение на работната сила. Фокусът е инвестиране в човешки ресурси и по-точно - обновяване на компетентностите. Не какви да е компетентности, а необходимите за бъдещия зелен преход, устойчивост и предприемаческа активност. Това води до необходимост от оценка на значението на предприемаческата и зелена компетентност в контекста на променените изисквания и реалности на Индустрия 5.0. Цел на доклада е изследване на нагласите на бъдещите кадри по отношение ролята на тези компетентности за преминаването от образование към заетост и кариерното развитие. Изводите от изследването дават възможност да се формулират основни препоръки за използване на предприемачески модел, в който са интегрирани тези компетентности.

**Ключови думи:** предприемаческа компетентност, зелена компетентност, Индустрия 5.0, предприемачески модел, устойчивост

### Въведение

През последните няколко години изменените условия, новите външни фактори на икономическата и обществена среда и наложилите се световни тенденции променят хода на икономическото, технологично и социално развитие. Тези обстоятелства довеждат до необходимост от промени в технологиите, процесите, подходите и взаимоотношенията между икономическите субекти. В резултат и съобразно многобройните предпоставки се наложи логичен преход от Индустрия 4.0 към Индустрия 5.0, който изправи мениджърите в индустрията пред нови предизвикателства. При Индустрия 5.0 акцентът вече се поставя върху човешките ресурси като център на производствения процес и основен импулс за протичането и развитието му. Новата парадигма, която се налага в наднационален, европейски план, се изразява в това технологиите да са в полза на човека, а той активно да си сътрудничи с машините, които да подпомагат неговата дейност.

На този фон особено внимание получават предприемаческата и зелена компетентност като гарант за адекватност и съответствие на професионалния капацитет на специалистите спрямо изискванията на производствената и бизнес среда (ЕС, 2007; ЕС, 2018). Набирането, задържането и развитието на качествени и подходящи за съвременния етап на стопанско развитие човешки ресурси са важен и отговорен процес, от който зависи по-нататъшната дейност на организацията и ефективното ѝ функциониране като производствена система. Най-важните и отговорни стратегически решения на мениджърите, с които се очертава дългосрочен хоризонт, се оказват именно свързаните не само с подбора

на персонал, но и с развитието на неговия потенциал. По тази причина въпросът за новите компетенции – предприемаческата и зелената компетентност и тяхното значение за индустриалното развитие става по-значим и актуален тъй като бизнес развитието е функция от натрупването и развитието на съвременни и приложими в текущия контекст компетентности.

### Методични основи на изследването

Настоящото изследване е посветено на съвременните измерения на въпроса за съдържанието и значението на компетентностите в контекста на новите икономически, технологични и обществени тенденции и изисквания на пазара на труда. Критичният преглед на литературните източници за установяване състоянието на проучванията по поставения проблем показва, че липсват анализи по темата за българската индустрия и предприятия, които да са съобразени с новите реалности. Тези реалности вече се „рамкират“ от Индустрия 5.0 и зеления преход, които допълват нови към множеството вече налични предизвикателства пред бизнеса и образованието. Затова бизнесът и образованието следва да работят в перфектна симбиоза, за да изпълнят общите си цели – плавно, но същевременно бързо преминаване на младите специалисти от образование към заетост и кариерно развитие.

Актуалността на изследването е доказана и обоснована предвид факта, че темата е широко дискутирана на национално, европейско и международно равнище. Причина за сериозния научен и обществен интерес е значимостта на изследователския проблем за компетентностите и тяхна роля за професионалната

реализация и кариерно развитие на специалистите, както и за прехода от образование към заетост. Този интерес и значимост допълнително се увеличават в контекста на новите тенденции и перспективи за обществено-икономическо развитие – Индустрия 5.0 и зелен преход.

Обект на изследване са предприемаческата и зелена компетентност, които младите кадри – студенти в технически специалности, са натрупали и притежават. Потърсени и обобщени са техните становища и нагласи относно необходимостта от овладяване на зелена и предприемаческа компетентност на база самооценка на знанията, уменията, опита и компетенциите. Целта е да се установи дали те им отдават значение за намирането на заетост и кариерно развитие или ги смятат за несъществени за реализацията си – навременна и успешна.

Предмет на изследване е оценката на тяхното значение, направена през две перспективи. Първо, чрез създаване на теоретичните основи на изследването на база изясняване на същността на Индустрия 5.0 и нейната концептуална рамка, съдържанието на предприемаческата и зелена компетентност. Второ, на база разработване и попълване на анкетна карта-самооценка от страна на студентите, наблюдение и анализ на данни. Важен елемент в изследването е самооценката на извадка от студенти, отразяваща тяхната нагласа и мнение относно тяхната предприемаческа и зелена компетентност.

Участие в анкетното проучване вземат 90 студенти в Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“ в бакалавърска степен, редовно обучение, от всички специалности на университета. Поради редица ограничения при изпълнението е използван методът на отзовалите се. Изготвената анкетна карта-самооценка е изпратена на служебните имейли на всички студенти, записани в степен „бакалавър“ независимо от специалността. Анкетната карта е попълнена само от отзовалите се студенти, като същата е анонимна с оглед постигането на по-голяма обективност в даването на оценки. С такъв подход се цели избягване на притесненията на студентите да се самооценяват публично и да оповестяват резултатите пред група. По тази причина и предвид ограниченията на изследването, които са обективно обосновани, могат да се правят изводи само за съвкупността на отзовалите се студенти, която има мнение по въпроса и е готова да го изрази.

Основната хипотеза, която следва да се потвърди или отхвърли е, че принципите, които Индустрия 5.0 налага, изискват промяна в мисленето при решаване на основните производствени и обществени проблеми. Тази промяна е невъзможна без човешки ресурси, които да притежават нови знания, умения и нагласи, включени в предприемаческата и зелена компетентност. За да се извърши на практика тази промяна, тя преминава през самооценка и оценка на компетенциите, като отправна точка за очертаване на значението на компетентностите за намирането на заетост и кариерното развитие на излизащите на пазара на труда млади кадри.

Прилаганите методи и научноизследователски подходи при разработването на настоящия изследователски проект са проучване на научната литература, анализ, синтез, провеждане на анкетно проучване на база самооценка, абстракция, обобщение, системен, евристичен и графичен подход. Тези нови компетенции и умения са част от

факторите, оказващи влияние и при избора на работно място, представени в изследване от 2023 г. (Vladkova, Kostadinova, 2023).

Търсените резултати и приноси са по направление установяване на притежаваните знания, умения, опит в тези области и нагласи от бъдещите специалисти за решаване на проблеми. Съвременните проблеми са, от една страна свързани с ефективното използване на природните ресурси, а от друга – с отключване на потенциала на човешките ресурси в работния процес през натрупването и развитието на търсени от пазара на труда компетентности.

## **Принципи на Индустрия 5.0**

От изобретяването на парната машина в края на XVIII в. (Индустрия 1.0) до днес (Индустрия 5.0) производственият процес претърпява сериозен прогрес по отношение на използваните методи, ролята и участието на човешкия фактор в него (Щерев, 2018). Индустриалната революция е повратна точка в човешката история, тъй като има дълбоко въздействие върху обществото, културата и икономиката и оказва значително влияние върху глобалната икономика и начина, по който произвеждаме, потребяваме и разполагаме със стоки (Петрова, 2023).

Днес основният акцент в Индустрия 5.0 – като нова концепция за индустриално развитие, се поставя върху човека и дигитализацията на процесите. Тя не заменя изцяло предходната цифрова индустриална трансформация, а по-скоро я допълва и надгражда.

Като първи основен принцип на Индустрия 5.0 може да бъде посочено взаимодействието между човек и изкуствен интелект. Организациите имат за цел да изградят своите производства по начин, даващ възможност за активно сътрудничество между робот и човек. Индустрия 5.0 се насочва към сътрудничество между хората и роботите, като се използват силите и предимствата на всяка страна за постигане на по-добри резултати в производството.

Втори основен принцип на Индустрия 5.0 е процесът на квалификация и образование на персонала в контекста на следването на тенденцията за учене през целия живот (ЕС, 2008). Необходимо е да се градят и надграждат програми за системно повишаване на квалификацията и компетенциите на работниците, за да се справят с предизвикателствата на новите технологии. Технологичният напредък води до изменение на нужните качества на един работник в условията на Индустрия 5.0 (Пандурска, 2022). Компетенциите на работника не следва да се ограничават с извършването на заложените му професионални задължения. Следователно работната сила трябва да притежава съвременни умения и компетенции за справяне с проблеми в различни области на знание, като ги комбинира адекватно спрямо конкретния казус.

Трети основен принцип на Индустрия 5.0 са сигурността и етиката. Той се дефинира като създаване на сигурна и безопасна работна среда за персонала – основа за индустриално развитие.

Четвърти основен принцип на съвременния процес по индустриализация е персонализацията и индивидуализацията. В рамките на Индустрия 5.0 индивидуалният подход играе ключова роля. Той предполага производството на стоки и услуги, насочени



към индивидуалните желания на потребителя. В този смисъл индустрията е изправена пред предизвикателството да се съобрази с изискванията на своите потребители, удовлетворявайки ги пълноценно.

Пети основен принцип на Индустрия 5.0 е устойчивото развитие, заложено в основите на европейската политика. Устойчивото развитие е концепция, която подчертава необходимостта от постигането на баланс между икономическия напредък, социалното благосъстояние и опазването на околната среда. Успоредно с това следва да се осигури удовлетворяването на текущите потребности, без да се застрашава удовлетворяването на потребностите на бъдещите поколения.

Според принципите на Индустрия 5.0, които са основен фундамент за нейното изграждане, в настоящия контекст индустрията трябва да се ориентира към човека и природата, да взаимодейства с тях. На свой ред производството трябва да се обърне към индивидуалните нужди на потребителите като отговори по-пълноценно на тях. Новите реалности и променени условия и концепции изискват нов подход в производствения процес. Това налага организацията да имат ясни цели в следните направления:

- ориентиране към човека и към природата;
- съчетаване на технологията с човека и природата;
- използване на технологията като инструмент за справяне с екологичните проблеми;
- проучване и въвеждане в практиката на предприемаческата и зелена компетентност;
- обучение на персонала в придобиване на предприемаческа и зелена компетентност;
- приемане на постановката, че човекът и технологията могат да са едно цяло, а ресурсите да се използват по възможно най-ефективен начин в производствения процес, позволявайки тяхното повторно и последващо използване.

Всички тези нови постановки изменят изначално концепцията за индустриално развитие и предефинират нейния ход, като налагат преосмисляне на профила и компетенциите на човешките ресурси.

## Характеристика на предприемаческата и зелена компетентност

За целите на проучването и изясняване на съдържанието на предприемаческата компетентност е направен детайлен анализ на EntreComp - Европейската референтна рамка, която определя предприемачеството като компетентност за учене през целия живот (Vasigalupo, 2022). Рамката EntreComp е резултат от стабилна изследователска работа и утвърдена методология, която се използва в рамките на ЕС (Vasigalupo et al., 2016). Тя предлага изчерпателно описание на знанията, уменията и нагласите, които специалистите трябва да развият, за да имат предприемаческо мислене. Използването на рамката като инструмент за самооценка привлича вниманието на специалистите, представителите на бизнеса и академичната общност.

Тя е избрана да бъде използвана и в настоящото изследване, което цели представителност, достоверност, научна обосновааност и недвусмисленост в тълкуването на терминологията. Подобен подход е възприет и предвид необходимостта от разработване на анкета (самооценъчна

карта) с универсална и ясно дефинирана терминология, която да бъде разбрана от анкетираните.

Според EntreComp предприемаческата компетентност включва (ЕС, 2018):

- способност за поемане на риск и управлението му;
- нестандартно (иновативно) мислене и креативност;
- способност за решаване на проблеми, включително и по нетрадиционен (иновативен) начин;
- поемане на инициатива и на активна позиция;
- упоритост, последователност и постоянство в полагането на усилия;
- самостоятелност и способност за самомотивация;
- убеждаване и социални умения;
- умения за започване и управление на бизнес;
- умения за критично мислене;
- умения за работа в екип и в мрежа;
- умения за ефективна комуникация.

Развитието на предприемаческите компетенции, интегрирани в тази компетентност, предлага две предимства – помага на служителите да преминават от индивидуални към управленски роли и позволява на организацията да се развива и разраства с помощта на активните си служители. Предприемаческите знания, умения, опит и нагласи стават критично важни не само за развиването на собствени бизнес инициативи, но и за намирането на заетост и задържането на работното място за практически всеки специалист.

В обобщение на представените постановки, предприемаческата компетентност се изразява в умението, на първо място, за разпознаване, но и създаване и използване на възможности и управление на процеси, водещи до добавена стойност и полезност. Като многостранна и широкообхватна компетентност тя предполага и изисква задълбочен анализ и познаване на контекста, средата и възможностите и рисковете, а така също и собствения потенциал, който да се доразвие.

За целите на изследването и изграждането на неговата методология са анализирани изискванията на основните документи по отношение на зелената компетентност (GreenComp), а именно: Европейска програма за умения за постигане на устойчива конкурентоспособност, социална справедливост и издръжливост; Европейска стратегия за университетите; Препоръка на съвета относно ученето, насочено към екологичния преход и устойчивото развитие и Европейска рамка за компетентности в областта на устойчивостта. Описани са критериите за устойчивост на икономическите дейности.

Подходът към характеризиране на зелените умения е представен в Европейската програма за умения (ЕК, 2020). При това, една от основните задачи е определяне на таксономия на уменията за зеления преход, което ще позволи статистически мониторинг на екологизирането на професиите. Решението е създаване на Европейска рамка за компетентности в областта на устойчивостта – GreenComp (2022), която се състои от 12 компетентности, организирани в следните четири области (Bianchi, 2022):

- възприемане на ценности за устойчивост;
- възприемане на комплексността в понятието за устойчивост;
- прогнозиране на устойчиво бъдеще;
- действия за устойчивост.

Тъй като знанието е ресурс, който генерира добавена стойност (ЕС, 2010), следва че овладяването на зелена

компетентност би увеличило добавената стойност на придобитото висше образование чрез допълнителна полезност в съответствие с трите приоритета на стратегическата рамка на „Европа 2020“, а именно (ЕС, 2010): (1) интелигентен растеж — изграждане на икономика, основаваща се на знания и иновации; (2) устойчив растеж — насърчаване на по-екологична и по-конкурентноспособна икономика с по-ефективно използване на ресурсите; (3) приобщаващ растеж — насърчаване на икономика с високи нива на заетост, която да създава условия за социално и териториално сближаване. Следователно зелената компетентност се отнася до уменията, знанията, опитът и нагласите, реално приложени в практическа работна среда и необходими за успешното справяне с предизвикателствата на устойчивото и екологосъобразно бизнес развитие. Тази компетентност става важна за специалистите, организациите и обществото като цяло, тъй като спомага за постигането на баланс между икономическото развитие, социалната справедливост и опазването на околната среда.

Тези компетенции, интегрирани в зелена компетентност, стават все по-важни в светлината на нарастващата загриженост за опазването на околната среда и необходимостта от устойчиво развитие, което да върви успоредно с прогресивното бизнес развитие.

### Анализ на резултатите от изследването

В рамките на няколко месеца през 2024 г. бе проведено изследване на нагласите на бъдещите кадри по отношение ролята на предприемаческата и зелена компетентност за преминаване от образование към заетост и кариерно развитие. В изследването участват 90 студенти редовно обучение от всички курсове и специалности в МГУ „Св. Иван Рилски“. Въпросите, които са им зададени чрез попълване на онлайн анкета, касаят притежаваните от тях предприемаческа и зелена

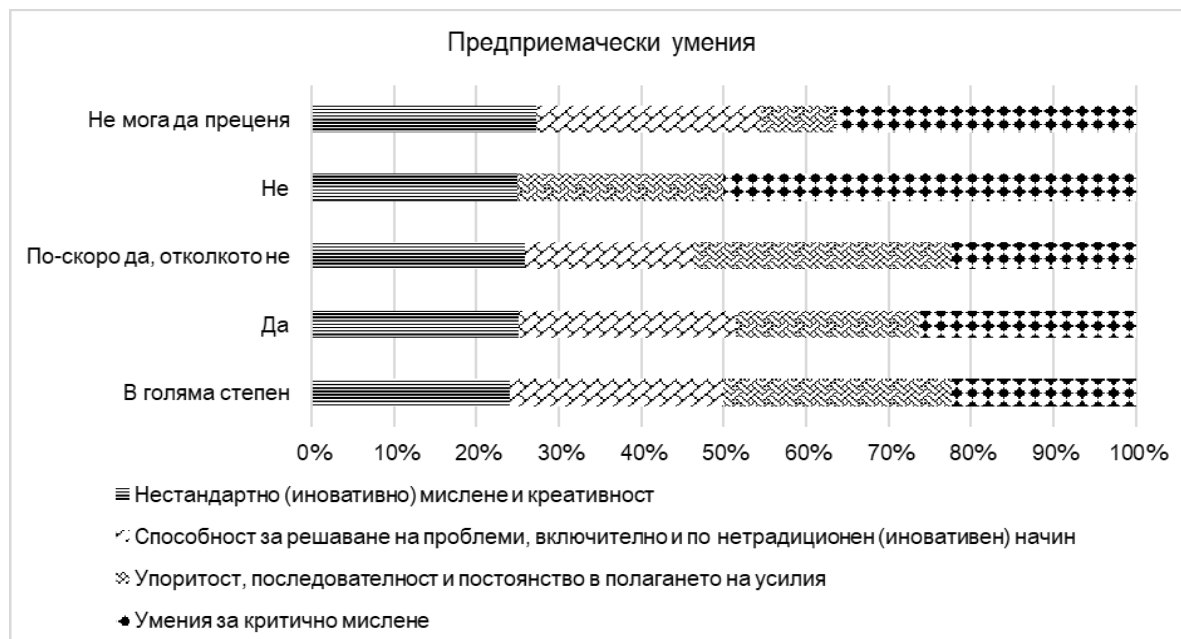
компетентност в частта, включваща уменията за решаване на проблеми. Именно способността за решаване на проблеми е посочвана от работодателите като ключова за специалистите в условия на силна динамика и при ежедневно възникване на казуси, които търсят решение в работната среда. Придобитото инженерно мислене дава възможност за най-ефективно управление на ресурсите в производствения процес позволявайки тяхното повторно използване. В комбинация със способността за решаване на проблеми, това би следвало да дава ценно конкурентно предимство на младите кадри при търсене на заетост и кариерно развитие.

Получените от анкетното проучване резултати са насърчителни и показват висока степен на сигурност и висока самооценка на анкетираните. Основният въпрос, който е поставен, е формулиран както следва: „Кои от следните компетенции, свързани с предприемаческата компетентност, смятате че притежавате и в каква степен?“

Във връзка с предприемаческата компетентност, въпросите са свързани с притежаването на следните умения, представени графично на фиг. 1:

- нестандартно (иновативно) мислене и креативност - с преобладаващ отговор „Да“ – 47,8%;
- способност за решаване на проблеми, включително и по нетрадиционен (иновативен) начин - с преобладаващ отговор „Да“ – 50%;
- упоритост, последователност и постоянство в полагането на усилия - с преобладаващ отговор „Да“ – 46,2%;
- умения за критично мислене - с преобладаващ отговор „Да“ – 50%.

На второ място и при четирите компетенции отговорите са: „В голяма степен“ – около 30%. В отговора „По скоро да, отколкото не“ се припознават около 15 %. Ниски са процентите на „Не“ и „Не мога да преценя“ – в рамките на 3%.

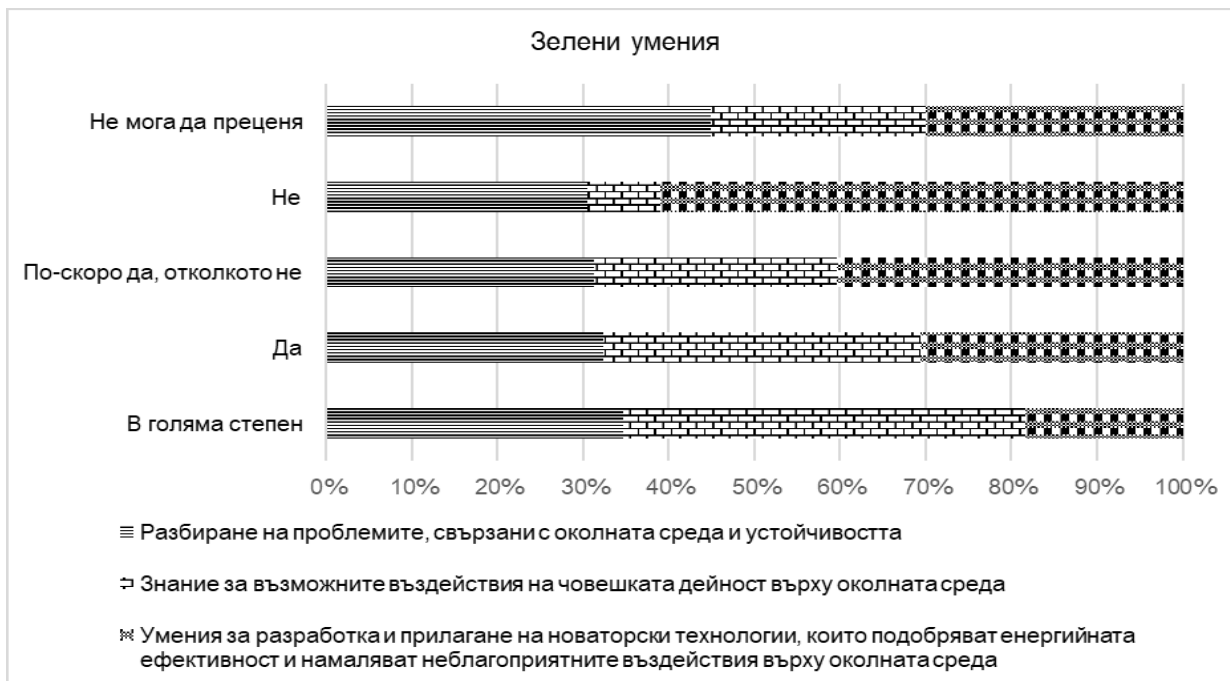


Фиг. 1. Самооценка на предприемаческите умения

Източник: Фигурата е създадена на база разработено и проведено от авторите анкетно проучване

Тези резултати са обясними предвид факта, че обучението в МГУ „Св. Иван Рилски“ има инженерна насоченост. Тя дава не само знания, но и самочувствието на бъдещите кадри, че притежават нестандартно мислене, креативност и умения за критично мислене, които са фундамент на инженерното образование. В резултат те са уверени, че имат способността за решаване на проблеми, включително и

по нетрадиционен (иновативен) начин, както и упоритостта да постигат търсения резултат. При тълкуването и възприемането на тези резултати следва да се обърне внимание, че те са формирани на база самооценка и следователно представят нагласата на студентите за техните знания, умения, опит и нагласа по отношение на компетентността им да бъдат предприемчиви, в частност да решават проблеми.



Фиг. 2. Самооценка на зелените умения

Източник: Фигурата е създадена на база разработено и проведено от авторите анкетно проучване

Във връзка със **зелената компетентност** въпросите бяха свързани с притежаването на следните умения: (фиг. 2)

- разбиране на проблемите, свързани с околната среда и устойчивостта - с преобладаващ резултат „Да“ – 40%. На второ място „По-скоро да, отколкото не“ – 23,3%;
- знание за възможните въздействия на човешката дейност върху околната среда - с преобладаващ резултат „Да“ – 45,6%. На второ място „В голяма степен“ – 25,6%;
- умения за разработка и прилагане на новаторски технологии, които подобряват енергийната ефективност и намаляват неблагоприятните въздействия върху околната среда - с преобладаващ резултат „Да“ – 37,8%. На второ място „По-скоро да, отколкото не“ – 30%.

Относително нисък дял получават отговорите „Не“ и „Не мога да преценя“ – те варират в рамките на 10-15%.

Изправени пред предстоящия зелен преход и предизвикателствата на устойчивото развитие и Индустрия 5.0, студентите от МГУ „Св. Иван Рилски“ се чувстват в по-голяма степен подготвени за тези промени. Анкетното проучване показва, че те смятат, че притежават разбиране на проблемите, свързани с околната среда и устойчивостта и знанието за възможните въздействия на човешката дейност върху околната среда. Дори в голяма степен, очертана от около 60% положителни отговори, смятат, че имат умения за разработка и прилагане на новаторски технологии, които подобряват енергийната

ефективност и намаляват неблагоприятните въздействия върху околната среда.

Тези резултати в голяма степен са обясними предвид няколко обстоятелства. Университетът, в който се обучават тези студенти, е обвързан с предприятията от минерално-суровинната индустрия, на които осигурява бъдещите кадри. Тази индустрия е неразривно свързана и насочена към опазване на околната среда, с акцент към екологичното и социално отговорното поведение. Посочените знания и умения се изучават и придобиват в множество дисциплини, преподавани в този университет, с което може да се обясни високата самооценка по отношение на подготовката и придобитите умения.

Разглеждайки кръстосано двата вида знания и умения, касаещи предприемаческата и зелена компетентност, резултатите сочат по-голяма увереност за притежаване на тези, свързани с предприемаческата отколкото със зелената компетентност. Това също е обяснимо и логично, поради факта, че на зелените умения започна да се обърща внимание в по-скоро време като важни и за работодателите и за обществото. Те започнаха да се разглеждат и засягат в образователната система и в сферата на неформалното образование едва в последните години.

И все пак, предизвикателствата на устойчивото и екологосъобразно бизнес развитие извеждат на преден план зелените умения, знания, опит и нагласи, които могат реално да се приложат в практическа работна среда.

Комбинацията между предприемаческите и зелените умения обаче гарантира релевантност спрямо изискванията и очакванията на бизнеса в контекста на характера на проблемите от практиката, които предстои да се решават. Тяхното обвързване дава възможност за изграждане на предприемачески модел, в който тези компетентности да се интегрират. Чрез тяхната интеграция се цели постигане на по-голяма ефективност, добавена стойност и адаптивност спрямо новите реалности.

## Заклучение

Въз основа на изследването бяха установени резултати с предимно положителни отговори относно притежаваните от студентите в МГУ „Св. Иван Рилски“ знания и умения, част от предприемаческата и зелена компетентност. Бъдещите кадри имат самочувствието, че могат да решават проблеми, свързани с ефективното използване на природните ресурси, както и с отключване на потенциала на човешките ресурси в работния процес. Те смятат, че притежават нестандартно и критично мислене, уверени са, че имат способността за решаване на проблеми по иновативен начин. В същото време посочват, че разбират проблемите, свързани с околната среда и устойчивостта, както и че осъзнават вредните въздействия на човешката дейност върху природата. Декларират сигурност, че могат да разработят и приложат новаторски технологии и подходи в практиката, чрез които да се подобри енергийната ефективност и да се намалят потенциалните неблагоприятни въздействия.

Вземайки под внимание резултатите, препоръките, които могат да се формулират, са в две посоки.

По отношение на предприятията-потребители на тези кадри:

- да изградят зелен предприемачески модел за управление, в който да бъдат интегрирани предприемаческата и зелена компетентност;

- да организират периодични обучения на своя персонал за усвояване на нови умения, необходими на днешната индустриална икономика, съобразно водещите тенденции и изисквания за индустриално развитие.

По отношение на образователните институции, обучаващи бъдещите специалисти:

- да заложат в обучението придобиване на знания и умения за решаване на актуални проблеми, така че кадрите да бъдат подготвени за новите изисквания на пазара на труда;

- да актуализират периодично учебните програми по учебните дисциплини спрямо промените, наложени от Индустрия 5.0.

Полезният ефект от прилагането на практика на тези препоръки може да се постигне само ако те се прилагат едновременно. В такъв случай може да се получи синергия и устойчивост в резултатите, а така също и да се улесни и благоприятства процесът на преминаване от образование към заетост и карьерно развитие.

## Литература

- Европейска комисия. (2020). Европейска програма за умения, <https://ec.europa.eu/social/main.jsp?langId=bg&caId=1223>
- Европейски съюз. (2010). Европа 2020. Стратегия за интелигентен, устойчив и приобщаващ растеж, <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2010:2020:FIN:BG:PDF>
- Пандурска Р. (2022). Ключови качествени характеристики на човешкия капитал в условия на Индустрия 5.0. *Сборник с доклади от Международна научна и практическа конференция „Управление на човешките ресурси“ Икономически университет – Варна*, том 1, с. 123-131
- Петрова, В. (2023). The impact of the industrial revolutions in the transition from linear to circular technology. *Годишник на МГУ „Св. Иван Рилски“, Том 66/2023 / Annual of the University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, Vol. 66/2023*, с. 328-332
- Щерев, Н. (2018). Развитие на индустрията на България. *Сборник от конференция „Предизвикателства пред индустриалния растеж в България“, Равда, България*, с. 13-23
- Bacigalupo, M. (2022). The European Entrepreneurship Competence Framework (EntreComp). A Conceptual Model Built and Tested by the European Commission's Joint Research Centre. *Journal of Creative Industries and Cultural Studies - JOCIS*, 2022, n. 4, p. 38-53
- Bacigalupo, M. (2016). *EntreComp: The Entrepreneurship Competence Framework*. EUR 27939 EN. Luxembourg (Luxembourg): Publications Office of the European Union; JRC101581
- Bianchi, G. et al. (2022). GreenComp The European sustainability competence framework, Punie, Y. and Bacigalupo, M. editor(s), EUR 30955 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, ISBN 978-92-76-46485-3, doi:10.2760/13286, JRC128040.
- European Commission. (2018). *EntreComp into Action. Get Inspired Make It Happen*. Luxembourg, Publications Office of the European Union, Luxembourg
- European Commission. (2008). *The European Qualifications Framework for Lifelong Learning (EQF)*, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg
- European Commission. (2007). *Key competences for lifelong learning: European Reference Framework*. Luxembourg, Publications Office of the European Union.
- European Commission. (2018). *The European Qualifications Framework: supporting learning, work and cross-border mobility*, doi:10.2767/750617
- Vladkova B., N. Kostadinova (2023). Study of Employment Type and Duration in Various Industries in Bulgaria for the Period 2019–2022; *Annual of University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski": Vol. 66/2023* pp. 299-305. <https://doi.org/10.5281/zenodo.83391>

## DEVELOPING KEY COMPETENCIES IN THE PROCESS OF TECHNICAL ENGLISH LEARNING AS A FOREIGN LANGUAGE

*Perihan Yusein*

*University of Mining and Geology „St. Ivan Rilski“–Sofia, Kardzhali Branch, 6600 Kardzhali; perihan.yusein@abv.bg*

**ABSTRACT.** The economic globalisation and the intensification of competition for jobs require adapting to constant changes. This article analyses the experience of teaching English language in a technical university as a channel to develop key competencies. Taking into account the specifics of the process of training specialists, the publication underlies the formation of professionally oriented core competencies and skills of future professionals: knowledge-information processing, problem solving, decision making, self-learning, self-management, creative thinking, communication skills, collaboration with people and learning to learn.

While teaching the English language, it is possible to form and improve not only proficiency in the foreign language and culture, but also initiative personality ready for life-long learning with improved level of communicative, information, organisational, reflexive, and other general and educational skills. This contributes to the development of students' analytical thinking, teamwork, creativity, and cognitive activity. They are crucial and allow graduates to act effectively in the field of engineering and professional communication.

**Keywords:** technical English, key competencies, foreign languages.

### РАЗВИВАНЕ НА КЛЮЧОВИ КОМПЕТЕНТНОСТИ В ПРОЦЕСА НА ОБУЧЕНИЕ ПО ТЕХНИЧЕСКИ АНГЛИЙСКИ КАТО ЧУЖД ЕЗИК

*Перихан Юсеин*

*Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“ - София, Филиал Кърджали, 6600 Кърджали*

**РЕЗЮМЕ.** Икономическата глобализация и засилването на конкуренцията за работни места изискват адаптиране към постоянните промени. Тази статия анализира опита от преподаването на английски език в технически университет като възможност за развитие на ключови компетентности. Отчитайки спецификата на процеса на обучение на специалисти, публикацията е основа за формирането на професионално ориентирани основни компетентности и умения на бъдещите специалисти: обработка на данни и информация, решаване на проблеми, вземане на решения, самообучение, самоуправление, творческо мислене, комуникативни умения, сътрудничество с хора и умения за учене.

При преподаването на английски език е възможно да се формират и усъвършенстват не само владенето на чуждия език и култура, но и да се създаде инициативна личност, подготвена за учене през целия живот с подобро ниво на комуникативни, информационни, организационни, рефлексивни и други общи и образователни умения. Това допринася за развитието на аналитичното мислене, умението за работа в екип, креативността и познавателната активност на студентите. Те са от решаващо значение и позволяват на завършилите да са ефективни в областта на инженерството и професионалната комуникация.

**Ключови думи:** технически английски, ключови компетентности, чужди езици.

## I. INTRODUCTION

In the contemporary interconnected world, proficiency in English has become indispensable, especially in the technical fields. As industries evolve and globalise, professionals are increasingly required to communicate complex ideas and collaborate with international counterparts. For non-native English speakers, mastering technical English is not only about fluency but also about developing key competencies crucial for success in their respective fields. Technical English encompasses specialised vocabulary, grammar, and communication skills tailored to specific fields, such as engineering, IT, and science. However, the process of learning technical English goes beyond mere linguistic acquisition; it involves cultivating a range of competencies essential for navigating professional environments effectively. The key competencies are increasingly important in today's world of globalisation. The most significant is the meaning of the concept of the key competencies, because its personal factor can be highlighted. The importance of key competencies is influenced by the changes of working system, requiring adequate professional knowledge and skills (Zimnayay, I. A. 2003). Broader knowledge and abilities guarantee easy adaptation and more flexibility on the labour market, higher employability, social security, and meaningful personal life. Key competencies define (Cheng, X. and Zhao, S. 2016) the

abilities reflecting behavioural characteristics and individual performance. English learning and teaching play a significant role in cultivating the personality of future engineers and should be shifted to language competence, thinking quality, learning ability, and cultural awareness. While teaching technical English as a foreign language, it is possible to form and improve not only proficiency in language, but also professional communication of future engineers, to develop persons with initiative who are able to work in a team and are getting ready for life-long learning.

Key competencies are abilities to perform many activities based on the set of knowledge, skills, and values that can be developed in various situations and adapted in different contexts. The concept of competencies defines personality behaviour and characteristics. It expresses, in a broad sense, adaptive and effective functioning of the person in order to create his/her wealth and successful life. The system of key competencies boosts sustainable student development.

The aim of the research is to perform a summary of key competencies.

The object of the research presented in this paper is the conceptualisation of some key competencies necessary for future mining engineers.

The methods of the research are literature review, analysis, and synthesis.



## **II. THEORETICAL FOUNDATION AND CONCEPTUALISATION OF KEY COMPETENCIES**

Teachers bear important responsibility and should explore and use different strategies to put the concept of key competencies into practice in the process of teaching English as a foreign language. Key competencies are the centralised embodiment of the value of engineering education. The important task of the course unit in English is to develop students' language communication skills and cultivate their key competencies in language practice activities. Through English learning, students gradually can form core abilities, correct values, essential qualities, and necessary character. The formation of key competencies (Khutorskoy, A.V., 2003) lays the foundation for life-long learning and promotes students to become well-rounded people. The process of English language learning puts forward higher requirements for the educational and teaching activities because it is also a process of establishing a correct cultural awareness and value orientation. English learning cannot be limited to teaching basic knowledge of textbooks, but also to paying attention to whether students can master knowledge about skills, attitudes, emotions, and other aspects in the process of English learning. Implementation of the method of integrating English key competencies into the teaching can avoid the occurrence of the “dumb English” phenomenon.

The results of pedagogical monitoring and analysis of the existing condition shows that in the first academic year in university, the students:

- Have low level of goal-setting, proficiency in planning and reflection;
- Have difficulties in summarising, compression, and annotation of information;
- Not always correctly build the statement, are not able to criticise structurally and with convincing argument during upholding their point of view.

It is necessary to focus attention on the identity of the student to open their personal potential through regular identification of opinions by means of exercises and using technological cards of cognitive, analytical, and practical training. Respect for the personal dignity of each of student creates a comfortable atmosphere in lessons. Self-determination training begins with express information offered to students for discussion. The students have to express a consent or disagreement according to the scheme: thesis – argument-summary and a different point of view are allocated. These exercises promote the formation of abilities to generalise, systematise, synthesise, and analyse. The goals of such training are the formation of critical thinking, tolerance, and communicative competence. The objectives are achieved if: students are able to state and prove their opinion, define the knowledge and compare the received information with available life experience. Also, discussions, role-playing games, sketch, round table methods are used. Out-of-class independent work of students is of great importance – it teaches reflection, promotes self-development of the personality, goal-setting, planning activities for the achievement of the purpose. Solving practical problems demands mobilisation of all intellectual abilities and actually performs an essential function of training a scientific-minded person.

The development of key competencies in the process of technical English learning as a foreign language at university is

possible by using guiding multi-dimensional interaction, situational teaching, by focusing on the improvement of students' language competence, cultivating their cultural awareness, enhancing their thinking quality, and adopting their emotional experience, as well as by taking into account students' learning effectiveness and the teaching efficiency of the lecturer (Shu, D. 2017). Front-line teachers must integrate goals of knowledge and skills, processes and methods, attitudes, values, and key competencies into real classroom teaching. The ultimate learning goal of students is to apply the acquired knowledge to real life, and make English not only a factor and tool for thinking and communication.

The basis of the key competencies of the course unit in English is language competence. It includes language knowledge and language skills, and helps students broaden their thinking and carry out cross-cultural communication. In turn, cross-cultural communication activities can improve students' language competence. Students' language skills can enable them to acquire language knowledge, master language skills, and form good language awareness and language thinking,

The learning ability can play a role in improving learning efficiency and help students to: form a good sense of self-management, form the ability to independently organise their own learning process, and develop good learning habits. It requires students to have a correct understanding of English, have a sense of active use of English, achieve the highest goal of thinking in English developing individual learning methods and strategies in the process of English learning. Learning to learn is a complex process in which, analysing a learning situation reflectively, a student can identify their strengths and weaknesses, and therefore use the proper strategy. The teacher must focus on developing students' English learning attitudes, motivation, and interests, their awareness and habits of actively participating in language practice to promote skills for autonomous learning and sustainable learning attention. Cultivating students' interest in learning is possible mainly through competition and praise.

The information processing and thinking quality includes the formation of students' logical, critical, and innovative thinking. It is necessary to collect and process information, forming correct value judgements about things, and to improve students' ability to raise, analyse and solve problems. Cultivating students' thinking quality can enhance their thinking about problems from new perspectives and methods, generate a spirit of daring to question and being good at putting new ideas forward.

Civil and social competencies participate in society in different functions and they include personal, inter-personal, and inter-cultural abilities. Persons must be confident and tolerant, with a sense of responsibility, able to understand and evaluate their own and other's opinions in a cooperation and constructive communication, creating a justice-based environment.

Cultural awareness is the value orientation of students' language learning and it emphasises on the formation of students' cross-cultural cognition, attitudes, and behavior. It has an important role in cultivating a sense of community with a shared future for mankind, establishes feelings of family and country, strengthens cultural self-confidence. Cultural awareness is the ability to communicate with people of culture and arts, developing and enriching one's cultural outlook, and participating in the artistic expression activities – clubs, societies, and associations.

The sense of initiative displays human creativity, thrusting, and the desire to be independent. It includes orientation towards the achievements and corresponds to entrepreneurship and risk tolerance – the ability to assume the risks and to act rationally in risky situations. This competency is necessary for everyone in a competitive job market and in the constantly changing world.

Integral parts of the conception of key competencies (Shi, J. 2014) are critical thinking, problem solving, risk assessment, and decision-making. They provide added value in active citizenship, social cohesion, satisfaction, and motivation by offering adaptability and flexibility.

Technical English learning often involves tackling real-world problems and case studies relevant to students' fields of study or professions. By grappling with challenges and brainstorming solutions, learners hone their problem-solving skills and learn to apply theoretical knowledge in practical contexts — an essential competency for the innovation and advancement in technical fields.

Technical English learning fosters critical thinking skills by engaging learners with complex concepts and problem-solving tasks. As they decipher technical texts, analyse data, and interpret instructions, students develop the ability to evaluate information critically and make informed decisions — a vital competency in professional settings where precision and accuracy are paramount.

Effective communication lies at the heart of professional success. Technical English learners not only acquire language skills but also learn to articulate ideas clearly and persuasively, both verbally and in writing. They practice drafting reports, giving presentations, and participating in discussions, enhancing their ability to convey technical information to diverse audiences with clarity and confidence.

With an increasingly globalised workforce, cross-cultural competence is indispensable. Technical English learning provides opportunities for learners to interact with peers from different cultural backgrounds, fostering empathy, tolerance, and adaptability. Understanding cultural nuances and communication styles is crucial for building successful collaborations and navigating multicultural work environments effectively.

The dynamic nature of technical fields necessitates a commitment to life-long learning. Technical English learners cultivate a growth mindset, recognising the importance of continuous skill development and staying abreast of industry trends and advancements. By embracing lifelong learning, professionals can adapt to evolving technologies and methodologies, ensuring their relevance and competitiveness in the global marketplace.

Teachers are faced with some issues in their practice:

1. Basically, they follow the inherent teaching model, ignoring topics and texts oriented to key competencies.
2. Too much attention is paid to testing, focusing on language training and memory instead of on more language practice activities.

### **III. STRATEGIES FOR CULTIVATING STUDENTS' KEY COMPETENCIES IN ENGLISH LEARNING IN THE TECHNICAL UNIVERSITY**

When students possess the English core competencies, they can learn and improve themselves during the learning process and truly apply the knowledge they have learned to

practical applications. Students can use the cognition formed in the process of English learning to think about various issues in their study or life, put forward their own opinions, and express them in their own ways. By changing the inherent understanding of English subject – that learning English is not only to learn knowledge about English itself, but also to allow master other skills that can improve one's overall quality – the students can have a positive learning attitude and a strong interest in learning English.

Teaching practice must improve students' perception of culture on the basis of their language skills. Method of comparing and contrasting is overused, and other methods such as immersion teaching, content-based approach, or a situational approach, are neglected. Teacher must pay attention to the development of intercultural awareness and intercultural communication skills, sharing creativity and imagination. Students should be provided with a global vision by learning the English language.

By creating a specific atmospheres or scenes relevant to the teaching context, we can enhance students' learning motivation, promote their learning potential, and stimulate them to have a positive emotional experience. Teacher should change the traditional knowledge explanation in the teaching process with provoking students' learning enthusiasm in vivid scenes and objective world, paying attention to comprehensive language ability, communicative teaching, and cooperative learning. It is possible to achieve the goal of helping students accurately, quickly, and proactively understand the knowledge learned on the issue, using activities and games that students are willing to participate in and that are based on their language capacity. Suggestions for improving the teachers' professional ability to increase their students' cultural awareness can be given, such as bridging the culture gap with good communication skills, celebrating traditional holidays and festivals, etc.

In order to improve teaching efficiency, activating the teaching model of “task+situation+activity” should allow students to engage in exploratory learning, enabling them to experience, understand, and apply language, comprehensively improving their listening, speaking, reading, and writing abilities, cultivating student' self-confidence and interest.

It is necessary to strengthen the teaching of English knowledge while appropriately infiltrating some cultural and emotional aspects, so that the knowledge that students master is not just grammar, phrases or words, but can extend to the related cultural connotations in English.

To develop students' deep thinking, a teacher should ask questions that guide and stimulate students' thirst of knowledge and curiosity. The cultivation of thinking predictability has an important role in accelerating students' cognitive process, improving its efficiency. The teacher can instruct students to think more organised and systematically, using activities as comparison, collation, analysis, and summary to infer the content of any text (Lin, C. 2016).

The main goal of learning guidance is to change students' learning attitudes. A teacher should: fully understand their students, take various measures to enhance students' awareness, and expand the range of strategic choices. For example, a teacher can guide students to divide long sentences into several short sentences, extract the main sentence from them, and temporarily remove the auxiliary explanatory parts as parentheses and clauses.

A teacher should try to set open questions in order to stimulate students' desire to think and promote their critical spirit. A lecturer should encourage students to cooperate and explore independently, to interact with students more, and respond positively to students' feedback, to provide as many opportunities as possible for students to express their personal views and ideas.

The construction of a mind map is an effective way – students interact with the text, which is beneficial to transfer the language they have learned and use it for richer and self-topic presentations. A teacher can guide students to refine the detailed, basic, and main information of a text, clarify the surface and deep information, summarise the author's views and the author's value orientation, streamlining the development of the text and constructing a thought map.

We know that in the teaching process, there are many ways to evaluate the learning effectiveness. A teacher should actively use multiple evaluation methods – a combination of formative, summative, and task-based evaluation methods to estimate students' academic performance. Also, a teacher should actively orientate students to conduct effective self-evaluation, to cultivate their abilities of self-regulation and self-monitoring during the learning process.

#### **IV. CONCLUSION**

World globalisation is accompanied by increasing mobility of technical specialists and they are now faced with new personality demands, like: to be not only highly educated and competent, but also ready to prompt changes in society and continuous development, capable to estimate cross-cultural and linguistic situations, tolerant, able to apply own knowledge rationally, etc. The learning of English language is an approach to cultivate students' key competencies. This process requires the teacher to combine (attach) language, thinking, and culture as an integral part of English learning activities. Learning English as a foreign language in technical universities is not only a means of learning linguistic knowledge, but also a bridge to cultivating core competencies. During the English language teaching, the teacher should not only pay attention to the instrumental nature of the educational process – the language as a tool for communication, for thinking, for learning other subjects – but must also focus on the humanistic nature of English teaching, e.g. international perspectives, value

orientation, culture, thinking patterns, cross-cultural understanding, and social responsibilities. The formation and improvement of key competencies of future professionals in the course of the educational process in a modern university is a difficult and rather long process. It is preceded by two essential periods: the period of accumulation of the cognitive component, and the period of the analysis of knowledge. The main concern of the study is whether the teacher can distinguish between the key competencies and a sufficient understanding of the English language. The development of students' key competencies in the process of technical English learning as a foreign language requires appropriate content in the teaching resources and materials, as well as institutional support.

In conclusion, technical English learning as a foreign language is not merely about mastering linguistic structures; it is a multifaceted process that nurtures a range of key competencies essential for one's success in technical professions. From language proficiency and critical thinking to cross-cultural competence and digital literacy, the journey of learning technical English equips individuals with the skills and abilities needed to thrive in today's interconnected world. By embracing these competencies, learners can confidently navigate the complexities of their chosen fields and contribute to innovation and progress on a global scale.

#### **References**

1. Cheng, X. and Zhao, S. (2016). On student key competency in English as a foreign language. *Curric. Teach. Method* 36, 79-86.
2. Khutorskoy, A.V. (2003). *Key competences. Technology of designing/Pedagogics*, M., vol.5, 2003.
3. Lin, C. (2016). Research on the key competencies of student development in the 21<sup>st</sup> century, *Beijing Normal University Press*.
4. Shi, J. (2014). Key competencies: in order to cultivate all-round development people. *People Educ.* 10, 13-15.
5. Shu, D. (2017). Some thoughts on the key competencies of English subject. *Shandong Foreign Lang. Teach.* 2, 35-41.
6. Zimnayay, I. A. (2003). Key competencies – a new paradigm of education result. *Higher education today*, 5, 35-41





**UNIVERSITY OF  
MINING AND GEOLOGY  
“ST. IVAN RILSKI”**

[www.mgu.bg](http://www.mgu.bg)