

eISSN 2500-0632



# MINING SCIENCE AND

TOM  
VOL. 6, № 4  
2021

# TECHNOLOGY

(RUSSIA)

GORNYE NAUKI I TEKHNologii

ГОРНЫЕ НАУКИ И ТЕХНОЛОГИИ

**MISIS**



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИСИС»  
NATIONAL UNIVERSITY OF SCIENCE  
AND TECHNOLOGY MISIS





Activities of the *Mining Science and Technology (Russia) (Gornye nauki i tekhnologii)* international journal are aimed at developing international scientific and professional cooperation in the field of mining. The journal target audience comprises researchers, specialists in the field of mining, representatives of academic and professional communities.

The journal publishes original papers describing research findings, experience in the implementation of projects in mining industry, review publications.

The journal seeks to develop interdisciplinary areas that contribute to progress in mining, for example, technological and environmental safety, project organization and management in mining industry, development of territories, legal aspects of natural resource use, and other areas studied by researchers and practitioners. The journal always welcomes new developments. Papers are accepted in English or Russian.

#### EDITOR-IN-CHIEF

**Vadim L. Petrov**, Dr.Sci.(Eng.), Prof., National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation

#### DEPUTIES EDITOR-IN-CHIEF

**Oleg I. Kazanin**, Dr.Sci.(Eng.), Prof., National Mineral Resources University "University of Mines", St. Petersburg, Russian Federation

**Svetlana A. Epshtein**, Dr.Sci.(Eng.), National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation

#### EDITORIAL BOARD

**Zach Agioutantis**, Ph.D., Prof., University of Kentucky, Lexington, Kentucky, USA

**Maksim Bogdasarou**, Dr.Sci.(Geol. Mineral.), Prof., Brest State A.S. Pushkin University, Brest, Belarus

**Xuan Nam Bui**, Dr.Sci., Prof., Hanoi University of Mining and Geology, Duc Thang – Bac Tu Liem, Hanoi, Vietnam

**Carsten Drebenstedt**, Ph.D., Prof., Freiberg University of Mining and Technology, Freiberg, Germany

**Akper Feyzullaev**, Dr.Sci.(Geol. Mineral.), Prof., Institute of Geology and Geophysics of the National Academy of Sciences of Azerbaijan, Baku, Azerbaijan

**Monika Hardygora**, Ph.D., Prof., Wroclaw University of Technology, Wroclaw, Poland

**Nikolae Ilias**, Dr.Sci.(Eng.), Prof., University of Petrosani, Petrosani, Romania

**Vladislav Kecojevic**, Ph.D., Prof., Benjamin M. Statler College of Engineering and Mineral Resources, West Virginia University, Morgantown, West Virginia, USA

**Aleksey A. Khoreshok**, Dr.Sci.(Eng.), Prof., Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russian Federation

**Vladimir I. Klishin**, Dr.Sci.(Eng.), Prof., Institute of Coal, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Kemerovo, Russian Federation

**Vladimir N. Koshelev**, Dr.Sci.(Chem.), Prof., National University of Oil and Gas "Gubkin University" (Gubkin University), Moscow, Russian Federation

**Vladimir A. Makarov**, Dr.Sci.(Geol. Mineral.), Prof., Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

**Oleg S. Misnikov**, Dr.Sci.(Eng.), Prof., Tver State Technical University, Tver, Russian Federation

**Valery V. Morozov**, Dr.Sci.(Eng.), Prof., National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation

**Bakhadirzhan R. Raimzhanov**, Dr.Sci.(Eng.), Prof., Uzbekistan Research, Design and Survey Institute for Geotechnology and Nonferrous Metallurgy – O'zGEORANGMETLITI, Tashkent, Uzbekistan

**Bayan R. Rakishev**, Dr.Sci.(Eng.), Prof., Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpayev, Alma-Ata, Kazakhstan

**Oscar Jaime Restrepo Baena**, Ph.D., Prof., National University of Colombia, Medellín, Colombia

**Alexander N. Shashenko**, Dr.Sci.(Eng.), Prof., National Mining University, Dnipro, Ukraine

**Vadim P. Tarasov**, Dr.Sci.(Eng.), Prof., National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation

**Denis P. Tibilov**, Dr.Sci.(Econ.), Prof., Moscow State Institute of International Affairs (University) under the Ministry of Foreign Affairs of Russia, Moscow, Russian Federation

**Niyaz Valiev**, Dr.Sci.(Eng.), Prof., The Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russian Federation

#### EDITORIAL COUNCIL

**Yuri G. Agafonov**, Cand.Sci.(Eng.), Ass. Prof., National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation

**Michael R. Filonov**, Cand.Sci.(Eng.), Ass. Prof., National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation

**Leonid A. Plaschansky**, Dr.Sci.(Eng.), Prof., National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation

**Yuri I. Razorenov**, Dr.Sci.(Eng.), Prof., Platov South-Russian State Polytechnic University, Novochebassk, Russian Federation

#### EXECUTIVE SECRETARY

**Daria P. Galushka**, National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation

#### QUARTERLY

FOUNDED in 2016


#### REGISTRATION

The journal science and applied research journal is registered by the Federal Service for Communication, IT and Mass Communication Control on August 10, 2015. Registration Certificate E-No. ФС77-62652

#### INDEXATION

Scopus, CAS, EBSCO, DOAJ, РИНЦ, ВИНТИ РАН, Dimensions, BASE, J-Gate, Jisc Library Hub Discover.

#### FOUNDER AND PUBLISHER

 The National University of Science and Technology MISIS (NUST MISIS)

#### CONTACT

4 Leninsky Prospect, Moscow 119049, Russian Federation  
Phone: +7 (495) 955-00-77  
e-mail: [send@misis.ru](mailto:send@misis.ru)



This work is licensed under a  
[Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).



Деятельность научно-практического журнала «Горные науки и технологии» (Mining Science and Technology (Russia)) направлена на развитие международного научного и профессионального сотрудничества в области горного дела.

Целевая аудитория журнала – исследователи, специалисты в области горного дела, представители академического и профессионального сообществ.

В журнале публикуются оригинальные статьи, описывающие результаты исследований, опыт реализации проектов в горнопромышленном комплексе, обзорные публикации.

Журнал стремится развивать такие междисциплинарные направления, как технологическая и экологическая безопасность, организация и управление проектами в горной промышленности, развитие территорий, правовые аспекты использования природных ресурсов и другие, которые способствуют прогрессу в горном деле и реализуются исследователями и практиками.

## ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

**Петров Вадим Леонидович**, д.т.н., проф., НИТУ «МИСиС», г. Москва, Российская Федерация

## ЗАМЕСТИТЕЛИ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

**Казанин Олег Иванович**, д.т.н., проф., Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

**Эпштейн Светлана Абрамовна**, д.т.н., НИТУ «МИСиС», г. Москва, Российская Федерация

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

**Агиутантис Зак**, д-р наук, проф., Университет Кентукки, г. Лексингтон, Кентукки, США

**Богдасаров Максим Альбертович**, д.г.-м.н., проф., Брестский государственный университет им. А.С. Пушкина, г. Брест, Беларусь

**Буи Нам Хуан**, д-р наук, проф., Ханойский университет горного дела и технологии, Ханой, Вьетнам

**Валиев Нияз Гадым оглы**, д.т.н., проф., Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Российская Федерация

**Дребенштедт Карстен**, д-р наук, проф., Технический университет Фрайбергская горная академия, г. Фрайберг, Германия

**Илиаш Николае**, д.т.н., проф., Университет Петрошани, г. Петрошани, Румыния

**Кецоджевич Владислав**, д-р наук, проф., Институт инженерного дела и минеральных ресурсов им. Бенджамина М. Статлера Университета Западной Вирджинии, Моргантаун, Западная Вирджиния, США

**Клишин Владимир Иванович**, д.т.н., проф., Институт угля Сибирского отделения Российской академии наук, г. Кемерово, Российская Федерация

**Кошелев Владимир Николаевич**, д.х.н., проф., Российский государственный университет нефти и газа им. И.М. Губкина, г. Москва, Российская Федерация

**Макаров Владимир Александрович**, д.г.-м.н., проф., Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Российская Федерация

**Мисников Олег Степанович**, д.т.н., проф., Тверской государственный технический университет, г. Тверь, Российская Федерация

**Морозов Валерий Валентинович**, д.т.н., проф., НИТУ «МИСиС», г. Москва, Российская Федерация

**Раимжанов Бахадиржан Раимжанович**, д.т.н., проф., Узбекский научно-исследовательский и проектно-изыскательский институт геотехнологии и цветной металлургии «O'zGEORANGMETLITI», г. Ташкент, Узбекистан

**Ракишев Баян Ракишевич**, д.т.н., проф., Казахский национальный исследовательский технический университет им. К.И. Сатпаева, г. Алма-Ата, Казахстан

**Рестрепо Баэна Оскар Хайме**, д-р наук, проф., Национальный университет Колумбии, г. Медельин, Колумбия

**Тарасов Вадим Петрович**, д.т.н., проф., НИТУ «МИСиС», г. Москва, Российская Федерация

**Тибиллов Денис Петрович**, д.э.н., проф., Московский государственный институт международных отношений (Университет) Министерства иностранных дел России, г. Москва, Российская Федерация

**Фейзуллаев Акпер Акпер оглы**, д.г.-м.н., проф., Институт геологии и геофизики (ИГГ) Национальной Академии Наук Азербайджана, г. Баку, Азербайджан

**Хорешок Алексей Алексеевич**, д.т.н., проф., Кузбасский государственный технический университет им. М.С. Горбачева, г. Кемерово, Российская Федерация

**Шашенко Александр Николаевич**, д.т.н., проф., Национальный горный университет, г. Днепр, Украина

**Хардигора Моника**, д-р наук, проф., Вроцлавский технологический университет, Вроцлав, Польша

## РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

**Агафонов Юрий Григорьевич**, к.т.н., доц., НИТУ «МИСиС», г. Москва, Российская Федерация

**Плащанский Леонид Александрович**, к.т.н., проф., НИТУ «МИСиС», г. Москва, Российская Федерация

**Разоренов Юрий Иванович**, д.т.н., проф., Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М. И. Платова, г. Новочеркасск, Российская Федерация

**Филонов Михаил Рудольфович**, д.т.н., проф., НИТУ «МИСиС», г. Москва, Российская Федерация

## ОТВЕТСТВЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ

**Галушка Дарья Петровна**, НИТУ «МИСиС», г. Москва, Российская Федерация

**ПЕРИОДИЧНОСТЬ** 4 раза в год

**ОСНОВАН** в 2016 году


## РЕГИСТРАЦИЯ

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций 10 августа 2015 года.


Свидетельство о регистрации Эл № ФС77-62652.

## ИНДЕКСИРОВАНИЕ

Scopus, CAS, EBSCO, DOAJ, РИНЦ, ВИНТИ РАН, Dimensions, BASE, J-Gate, Jisc Library Hub Discover.

 Журнал открытого доступа.

## УЧРЕДИТЕЛЬ И ИЗДАТЕЛЬ

 Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (НИТУ «МИСиС»)

## АДРЕС УЧРЕДИТЕЛЯ И ИЗДАТЕЛЯ

119049, г. Москва, Ленинский проспект, д. 4

## КОНТАКТЫ РЕДАКЦИИ

Адрес: 119049, г. Москва, Ленинский проспект, д. 4

Телефон: +7 (495) 955-00-77

e-mail: [send@misis.ru](mailto:send@misis.ru)



Контент доступен под лицензией  
Creative Commons Attribution 4.0 License.



## CONTENTS

### SAFETY IN MINING AND PROCESSING INDUSTRY AND ENVIRONMENTAL PROTECTION

- Mapping coal fires using Normalized Difference Coal Fire Index (NDCFI):  
case study at Khanh Hoa coal mine, Vietnam..... 233  
*L. H. Trinh, V. N. Nguyen*

### MINE SURVEYING

- Prediction of ground subsidence due to underground mining through time  
using multilayer feed-forward artificial neural networks and back-propagation algorithm –  
case study at Mong Duong underground coal mine (Vietnam)..... 241  
*Q. L. Nguyen, Q. M. Nguyen, D. T. Tran, X. N. Bui*

### MINERAL RESOURCES EXPLOITATION

- Sublevel stoping with applying artificial hardening stowing pillars for extraction of veins  
in complicated geotechnical conditions ..... 252  
*Sh. I. Khakimov, Sh. R. Urinov*

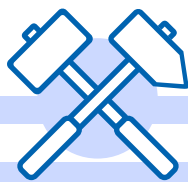
### MINING ROCK PROPERTIES. ROCK MECHANICS AND GEOPHYSICS

- Grain size distribution of waste rock masses of Kuzbass coal strip mines..... 259  
*S. O. Markov, E. V. Murko, F. S. Nepsha*

### MINING MACHINERY, TRANSPORT, AND MECHANICAL ENGINEERING

- Increasing life of pit dump truck motor-wheel gearboxes by introducing  
the monitoring of the actual technical condition..... 267  
*A. A. Khoreshok, A. V. Kudrevatykh, A. S. Ashcheulov, A. V. Vinidiktov, L. I. Kantovich*





## СОДЕРЖАНИЕ

### ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ В МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОМ КОМПЛЕКСЕ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

- Выявление пожаров на угольных рудниках с использованием стандартизированного относительного индекса горения угля на примере угольного рудника Кханьхоа, Вьетнам (на англ. яз.) ..... 233  
*Л. Х. Чинь, В. Н. Нгуен*

### МАРКШЕЙДЕРИЯ

- Прогнозирование просадки грунта в результате подземной добычи с использованием многослойных искусственных нейронных сетей с прямой связью и алгоритма обратного распространения – исследование на примере подземного угольного рудника Монг Дуонг (Вьетнам) (на англ. яз.) ..... 241  
*К. Л. Нгуен, К. М. Нгуен, Д. Т. Тран, Х. Н. Буй*

### РАЗРАБОТКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

- Подэтажная система с искусственными целиками из твердеющей закладки для разработки жил в сложных геомеханических условиях ..... 252  
*Ш. И. Хакимов, Ш. Р. Уринов*

### СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД. ГЕОМЕХАНИКА И ГЕОФИЗИКА

- Гранулометрический состав отвальных массивов разрезов Кузбасса ..... 259  
*С. О. Марков, Е. В. Мурко, Ф. С. Непша*

### ГОРНЫЕ МАШИНЫ, ТРАНСПОРТ И МАШИНОСТРОЕНИЕ

- Увеличение ходимости редукторов мотор-колес карьерных самосвалов методом внедрения контроля фактического технического состояния ..... 267  
*А. А. Хорешок, А. В. Кудреватых, А. С. Ацеулов, А. В. Винидиктов, Л. И. Кантович*





## SAFETY IN MINING AND PROCESSING INDUSTRY AND ENVIRONMENTAL PROTECTION

Research article

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-4-233-240>

## Mapping coal fires using Normalized Difference Coal Fire Index (NDCFI): case study at Khanh Hoa coal mine, Vietnam

L. H. Trinh<sup>1</sup>  , V. N. Nguyen<sup>2</sup>   <sup>1</sup>Le Quy Don Technical University, Hanoi, Vietnam<sup>2</sup>Hanoi University of Mining and Geology, Hanoi, Vietnam [nguyenvietnghia@humg.edu.vn](mailto:nguyenvietnghia@humg.edu.vn)

### Abstract

Khanh Hoa coal mine (Thai Nguyen province) is one of the largest coal mines in the north of Vietnam. For many years, this area suffered from underground fires at coal mine waste dumps, seriously affecting production activities and the environment. This paper presents the results of classification of underground fire areas at Khanh Hoa coal mine using Normalized Difference Coal Fire Index (NDCFI). 03 Landsat 8 OLI TIRS images taken on December 2, 2013, December 10, 2016, and December 3, 2019 were used to calculate NDCFI index, and then classify the underground fire areas by thresholding method. In the study, the land surface temperature was also calculated from Landsat 8 thermal infrared bands data, and then compared with the results of underground coal fire classification at Khanh Hoa coal mine. The obtained results showed that the NDCFI index can be used effectively in detecting and monitoring underground fire areas at coal mines. The use of the NDCFI index also has many advantages due to its calculation simplicity and rapidness compared to other methods for classifying underground coal fire areas.

### Key words

coal fire, Khanh Hoa coal mine, Landsat data, NDCFI index, remote sensing

### For citation

Trinh L. H., Nguyen V. N. Mapping coal fires using Normalized Difference Coal Fire Index (NDCFI): case study at Khanh Hoa coal mine, Vietnam. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021;6(4):233–240. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-4-233-240>

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ В МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОМ КОМПЛЕКСЕ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Научная статья

## Выявление пожаров на угольных рудниках с использованием стандартизированного относительного индекса горения угля на примере угольного рудника Кханьхоа, Вьетнам

Л. Х. Чинь<sup>1</sup>  , В. Н. Нгуен<sup>2</sup>   <sup>1</sup>Технический университет им. Ле Куи Дон, г. Ханой, Вьетнам<sup>2</sup>Ханойский горно-геологический университет, г. Ханой, Вьетнам [nguyenvietnghia@humg.edu.vn](mailto:nguyenvietnghia@humg.edu.vn)

### Аннотация

Угольный рудник Кханьхоа (провинция Тхай Нгуен) – один из крупнейших угольных рудников на севере Вьетнама. В течение многих лет в этом районе происходили подземные пожары в отвалах рудника, что оказывало заметное негативное воздействие на производственную деятельность и окружающую среду. В данной статье представлены результаты классификации участков подземных пожаров на угольном руднике Кханьхоа с использованием стандартизированного относительного индекса горения угля (NDCFI). Космоснимки, сделанные спутником 03 Landsat 8 OLI TIRS (с использованием инфракрасного сканера) 2 декабря 2013 года, 10 декабря 2016 года и 3 декабря 2019 года, были использованы для расчета индекса NDCFI, а затем классификации участков подземных пожаров методом пороговой фильтрации. В ходе исследования также рассчитывалась температура поверхности земли по данным измерений спутника Landsat 8 в тепловом инфракрасном диапазоне, а затем сравнивалась с результатами классификации подземных угольных пожаров на угольном руднике Кханьхоа. Полученные ре-





зультаты показали, что индекс NDCFI может быть эффективно использован для обнаружения и мониторинга участков/очагов подземных пожаров на угольных рудниках. Использование индекса NDCFI также имеет много преимуществ благодаря простоте и скорости расчетов по сравнению с другими методами классификации участков/очагов подземных угольных пожаров.

#### Ключевые слова

угольный пожар, угольный рудник Кханьхоа, дистанционное зондирование, индекс NDCFI, данные спутника Landsat

#### Для цитирования

Trinh L. H., Nguyen V. N. Mapping coal fires using Normalized Difference Coal Fire Index (NDCFI): case study at Khanh Hoa coal mine, Vietnam. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021;6(4):233–240. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-4-233-240>

## 1. Introduction

Most types of coal have the ability to self-ignite under certain environmental conditions (endogenous combustion). The generation and accumulation of heat is the major direct cause of the spontaneous coal combustion [1]. Underground fires at coal mines produce many toxic gases, especially carbon monoxide (CO) and carbon dioxide (CO<sub>2</sub>). It is very difficult to extinguish underground coal fires. This is an extremely dangerous phenomenon in underground mining, seriously affecting the environment and causing damage to buildings and infrastructure [2, 3].

Underground coal fires occur in practically leading coal producing countries of the world, such as India, China, Venezuela, USA, RSA [4]. There were coal fires covering area up to several hundreds square kilometers, lasting for many years and still not extinguished [5]. In Vietnam, some underground coal fires were recorded in Quang Ninh coal basin (2009), at Nong Son coal mine (Quang Nam province, 2011) and Khanh Hoa coal mine (Thai Nguyen province, 2014).

Remote sensing data are widely used in the world in early detection and monitoring of underground fires at coal mines. Most of these studies use land surface temperature calculated from the thermal infrared data from Landsat and Aster satellite images to monitor underground coal fires [6–12]. These studies all showed that land surface temperatures in underground coal fire areas were much higher than in the surrounding area, even compared to urban areas characterized by impervious surfaces. Research of [13] at the Raniganj coalbelt (India) showed that the temperatures in the overburden dumps of open cast mines ranged 28 to 32 °C and within the mine 35 to 38 °C. Moreover, in some places temperature was found to be as high as 68 °C [13]. Due to low spatial resolution of the thermal infrared band data of Landsat and Aster images, some recent studies integrated Landsat 8 and Sentinel 2 images to detect underground fire areas in more details [10, 14].

Located in Southeast Asia, Vietnam is rich in mineral resources with 10 billion tons of anthracite coal, more than 200 billion tons of brown coal in the northern delta area [15]. In recent years, a number of studies on the application of remote sensing data in early detection and monitoring of underground coal fires in Vietnam were performed. Trinh and Zablotskii [11] used multi-temporal Landsat image data to monitor the change of land surface

temperature at Khanh Hoa coal mine. The obtained results showed that the land surface temperature within coal mines and waste dumps was usually higher than 35 °C, while some areas had temperatures above 40 °C [11]. Landsat 8 image data and spatial analysis techniques were also used to predict underground fire locations at Khanh Hoa coal mine [12, 16]. Based on the analysis of the distribution of land surface temperatures calculated from Landsat satellite images, these studies enabled predicting fire locations, thereby providing information to help managers to promptly respond to underground fires at Khanh Hoa coal mines.

The use of land surface temperature data calculated from remote sensing images in monitoring of underground coal fires has the advantage of high accuracy of the results, but the calculation process is rather complicated. Band rationing method based on multi-spectral images with the advantages of simplicity in calculation and time-saving can be used effectively in classifying coal mining areas, including areas where underground fires occur [17]. Raju (2015) proposed using the Normalized Difference Coal Fire Index (NDCFI) to quickly map the areas where underground fires occur in the Jharia coalfield (India). In study [17], he observed that the spectral reflectance value of the pixels attributed to the fire exhibits maximum and minimum intensity response in band 8 (SWIR, 2.295 – 2.365 μm) and band 4 (SWIR, 1.600 – 1.700 μm) of Aster image, respectively. These spectral bands of the Aster images correspond to band 7 (SWIR2, 2.11 – 2.29 μm) and band 6 (SWIR1, 1.57 – 1.65 μm) of Landsat 8 OLI images. Thus, it is possible to use Landsat shortwave infrared bands to calculate NDCFI index for classification of underground coal fire areas.

This study presents the results of classification of underground fire areas at Khanh Hoa coal mine (Thai Nguyen province, northern Vietnam) based on Landsat 8 multi-temporal data using NDCFI index. 03 Landsat 8 images taken on December 2, 2013, December 10, 2016 and December 3, 2019 were used to calculate the NDCFI index, and then classify the underground coal fire areas using the thresholding method. In the study, we also compared the obtained results and the surface temperatures determined from the Landsat 8 data. This comparison allowed to demonstrate the effectiveness of the NDCFI index in classifying underground fire areas compared to the traditional method based on the land surface temperature measuring.



## 2. Materials and methodology

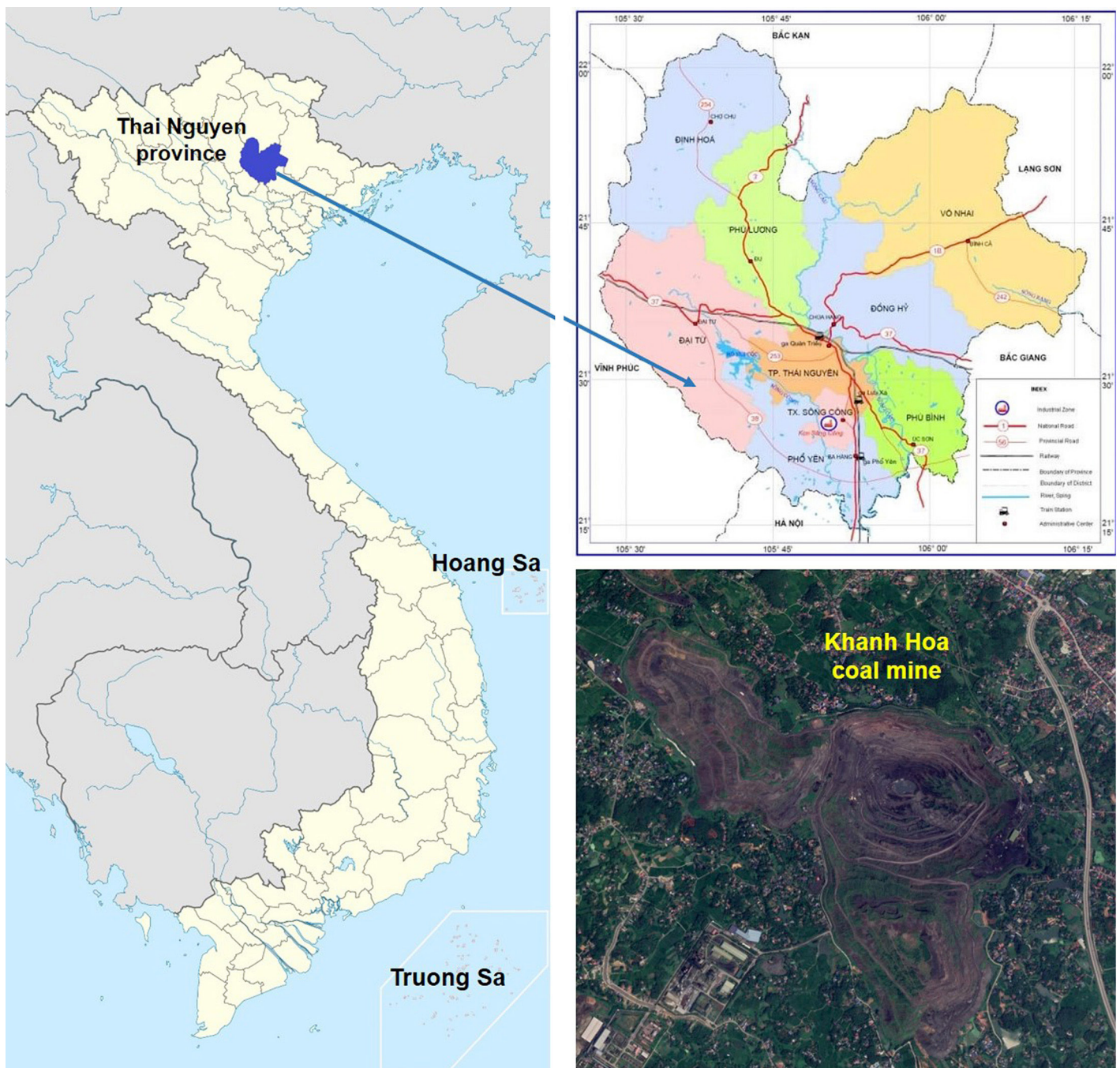
### *Study area*

Thai Nguyen is the province with the second largest coal reserves in Vietnam (reserves about 15 million tons of fat coal, 90 million tons of coal) after Quang Ninh province. Khanh Hoa coal mine is the largest coal mine in Thai Nguyen province with mining area and waste dump covering more than 300 hectares; the annual coal extraction capacity exceeds 600 kt of coal. Underground fires at coal mines and waste dumps of Khanh Hoa coal mine proceed for a long time, seriously affecting the quality of living environment and production activities. Although many solutions were applied, so far the

problem of underground fires at Khanh Hoa coal mine has not been completely solved. Geographical location of Khanh Hoa coal mine (Thai Nguyen province) is shown in Fig. 1.

### *Materials*

In this study, multispectral cloud-free Landsat 8 OLI\_TIRS images with spatial resolution of 30 m (multispectral bands) and 100 m (thermal infrared bands), taken on December 2, 2013, December 10, 2016, and December 3, 2019 in the Thai Nguyen province (northern Vietnam) were used for calculating NDCFI index. The Landsat 8 data present the L1C level product, downloaded from



**Fig. 1.** Location of Khanh Hoa coal mine, Thai Nguyen province, Vietnam

the United States Geological Survey website<sup>1</sup>. Landsat 8 image data used in this study are presented in Fig. 2, RGB = NIR:RED:GREEN.

**Methodology**

After acquiring, the Landsat 8 data were subjected to atmospheric correction [18] and geometric correction. The spectral reflectance values at short-wave infrared bands (band 6 and band 7) were used to calculate NDCFI index using the following formula [17]:

$$NDCFI = \frac{\rho_{SWIR2} - \rho_{SWIR1}}{\rho_{SWIR2} + \rho_{SWIR1}} \quad (1)$$

After calculating NDCFI index, thresholding method was applied to classify the underground coal fire areas. The threshold value was selected based on the NDCFI index analysis histogram.

In order to compare the results of the underground coal fire classification, we also calculated the land surface temperatures based on the Landsat 8 thermal infrared bands data. The split-window algorithm was used to calculate land surface temperatures from Landsat 8 data using the following formula [19–21]:

$$T_s = T_{B10} + c_1(T_{B10} - T_{B11}) + c_2(T_{B10} - T_{B11})^2 + c_0 + (c_3 + c_4w)(1 - \epsilon) + (c_5 + c_6w)\Delta\epsilon, \quad (2)$$

where:  $T_s$  – land surface temperature;  $T_{B10}$ ,  $T_{B11}$  – brightness temperature of bands 10 and 11 of Landsat 8 imagery;  $w$  – atmospheric water vapor content ( $g/cm^2$ ). The value of atmospheric water vapor content was calculated using formula proposed by Huazhong [22];  $\epsilon$  – mean emissivity;  $\Delta\epsilon$  – emissivity difference;  $c_0$  to  $c_6$  – values of split-window coefficients [23].

Flowchart (methodology) for the underground coal fire classification using NDCFI index calculated based on Landsat 8 OLI\_TIRS data is shown in Fig. 3.

<sup>1</sup> <http://glovis.usgs.gov> (Accessed: July 18, 2021)

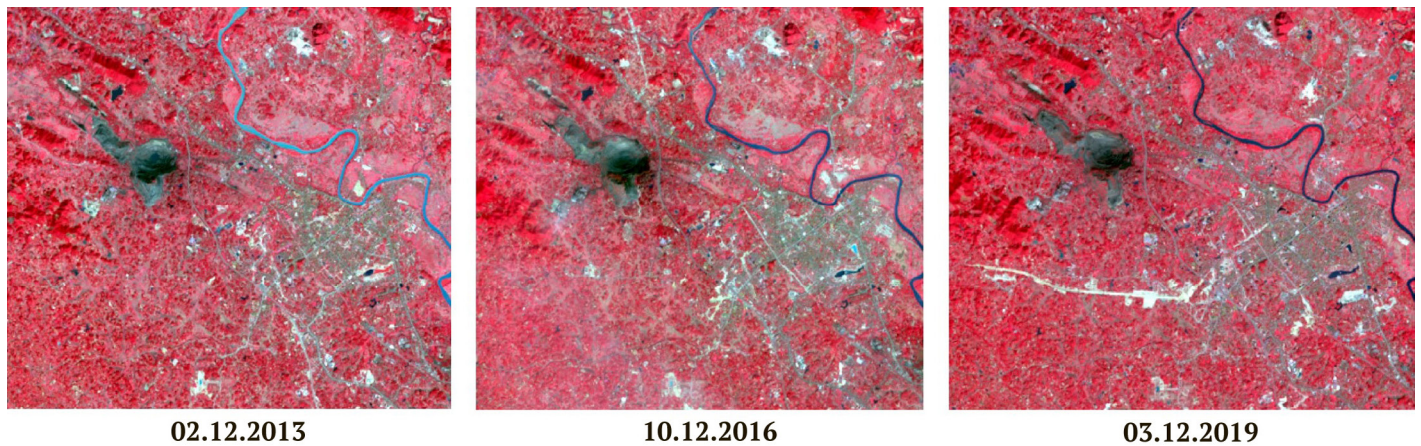


Fig. 2. Landsat multi-temporal imagery data for Khanh Hoa coal mine area

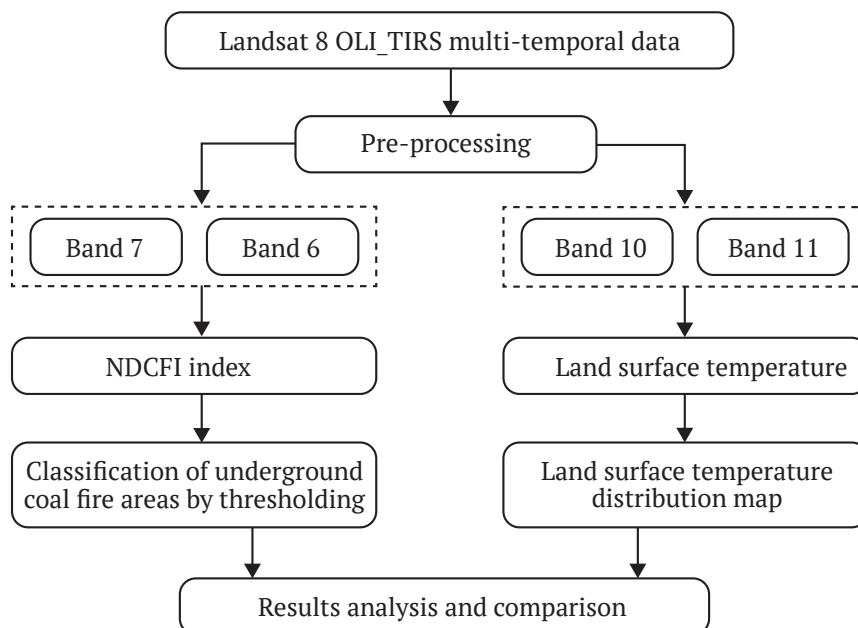


Fig. 3. Flowchart (methodology) for underground coal fire classification



### 3. Results and discussion

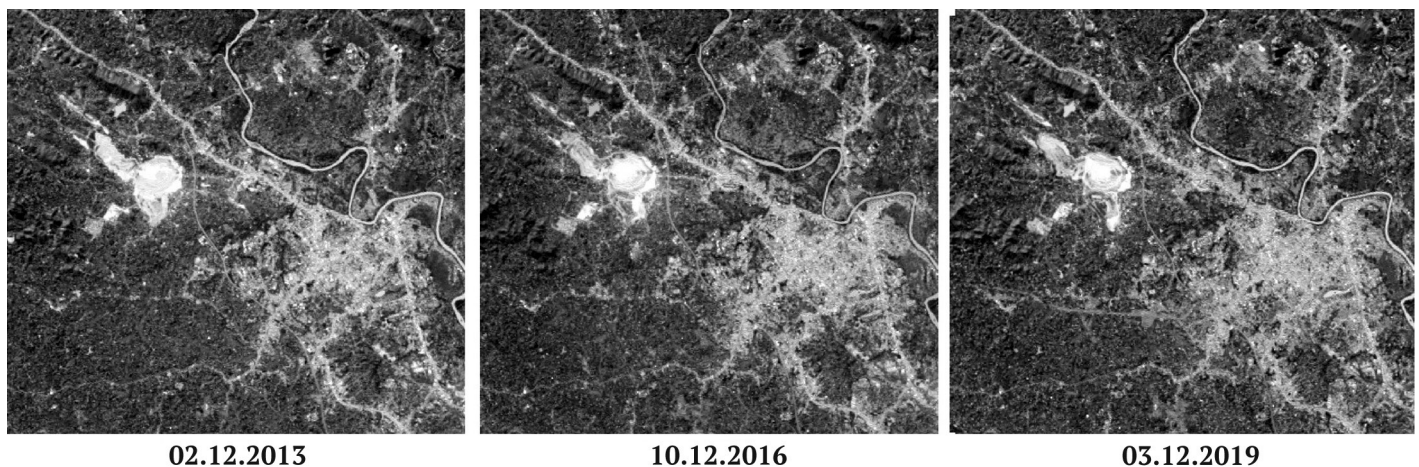
Figure 4 shows the NDCFI indices for Khanh Hoa coal mine (Thai Nguyen province) calculated based on Landsat 8 images taken on December 2, 2013, December 10, 2016 and December 3, 2019. On the NDCFI images, the Khanh Hoa coal mine is represented by bright pixels, differing from the surrounding area. The area within the Khanh Hoa coal mine and the waste dump, where the underground coal fire occurred, has the brightest color. This can be explained by the fact that the reflectance value of underground coal fire pixels at wavelength 2.11–2.29  $\mu\text{m}$  (band 7 of Landsat 8 image) is much higher than at wavelength 1.57–1.65  $\mu\text{m}$  (band 6 of Landsat 8 image). Meanwhile, the reflectance value of vegetation in band 7 is lower than in band 6 of Landsat 8 image, so vegetation is represented by dark pixels on the NDCFI index images. Built-up lands and bare lands are light gray on the NDCFI images because the difference in their spectral reflectance value in bands 6 and 7 of Landsat 8 image is not marked.

Based on the analysis of the NDCFI index histogram, threshold value was selected to classify the underground

coal fires. In the study area in Khanh Hoa coal mine (Thai Nguyen province), the threshold value to classify underground coal fire areas / surrounding areas was  $-0.22$ . The image processing to select the threshold value was performed using ENVI 5.2 software.

The results of the underground coal fire classification at Khanh Hoa coal mine (Thai Nguyen province) based on the NDCFI index calculated from Landsat 8 satellite images dated December 2, 2013, December 10, 2016 and December 3, 2019 are shown in Figure 5, where the underground coal fire areas are painted red, while the surrounding areas are white. The underground coal fire areas classified based on the NDCFI index in 2013, 2016, and 2019 covered 103.68 ha, 98.01 ha, and 93.87 ha, respectively.

To compare the results of underground coal fire classification at Khanh Hoa coal mine by using NDCFI index, the land surface temperatures were also calculated from Landsat 8 images. The land surface temperatures in the study area calculated from the Landsat 8 satellite images of 2013, 2016, and 2019 are presented in Fig. 6. The lowest and highest land surface temperatures on

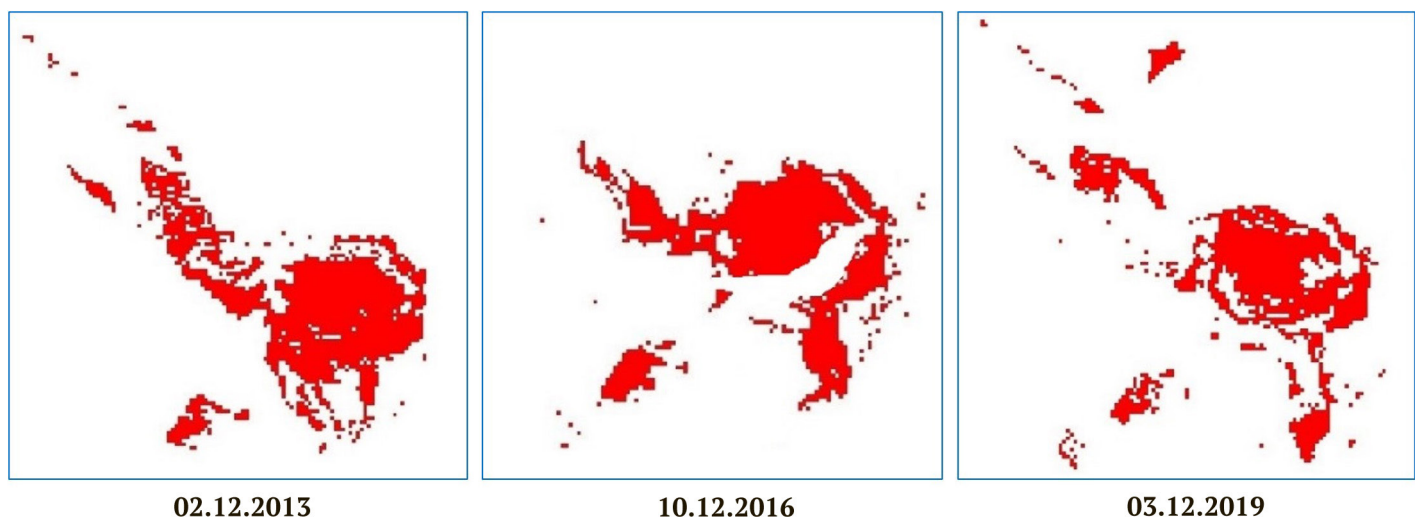


02.12.2013

10.12.2016

03.12.2019

Fig. 4. NDCFI index calculated based on Landsat images in the period of 2013–2019



02.12.2013

10.12.2016

03.12.2019

Fig. 5. The results of underground coal fire identification at Khanh Hoa coal mine based on NDCFI index by thresholding method



December 2, 2013, December 10, 2016, and December 3, 2019 were 21.02 °C and 38.82 °C, 20.95 °C and 38.31 °C, 19.86 °C and 38.92 °C, respectively. It can be seen that the difference between the highest and lowest land surface temperatures in the study area is not large. Areas of high land surface temperatures are locally distributed in Khanh Hoa coal mine area (shown by white pixels). The land surface temperatures in the inner city of Thai Nguyen are lower (about 30 to 35 °C), while the agricultural lands and forest areas have the lowest surface temperatures (less than 30 °C).

Figure 7 shows the land surface temperature spatial distribution maps for the area of Khanh Hoa coal mine location, which were obtained from Landsat 8 data. In this Figure, seven zones were identified with the following temperatures: below 20 °C, 20–23 °C, 23–26 °C, 26–29 °C, 29–32 °C, 32–35 °C, and above 35 °C. It can be seen that the land surface temperatures within the Khanh Hoa coal mine area was much higher than those in the surrounding areas, even compared to Thai Nguyen city, which was characterized by impervious surface.

Areas with land surface temperatures higher than 35 °C were concentrated within Khanh Hoa coal mine (shown by red in Fig. 7).

The areas with land surface temperatures higher than 35 °C calculated from Landsat 8 images in December 2, 2013, December 10, 2016 and December 3, 2019 covered 101.16 ha, 96.60 ha, and 92.05 ha, respectively. Thus, it can be seen that the results of the underground coal fire classification using NDCFI index have very strong correlation with the high surface temperature areas, above 35 °C – the threshold temperature value for identifying underground coal fires [5]. The correlation coefficient between the NDCFI index and the land surface temperature on December 2, 2013, December 10, 2016, and December 3, 2019 reached 0.867, 0.807, and 0.862, respectively. The above findings show that NDCFI index can be effectively used in early detection and classification of underground coal fires. The use of NDCFI index for studying underground coal fires has advantages of its simplicity and rapidity compared to the method based on using land surface temperatures.

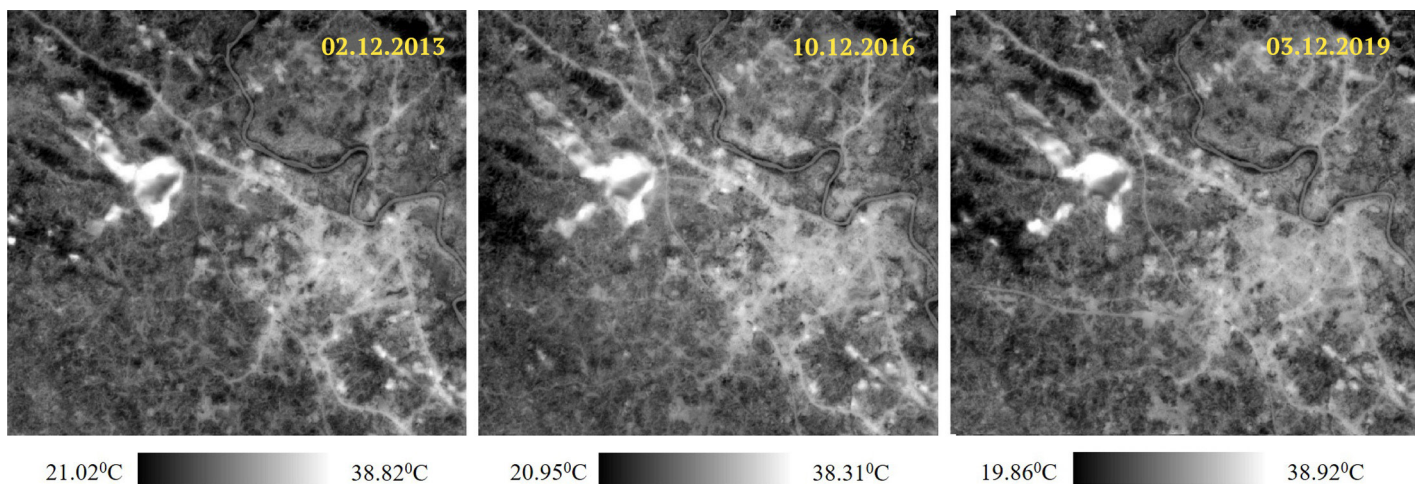


Fig. 6. Land surface temperatures in the study area calculated from Landsat 8 images in the period of 2013–2019

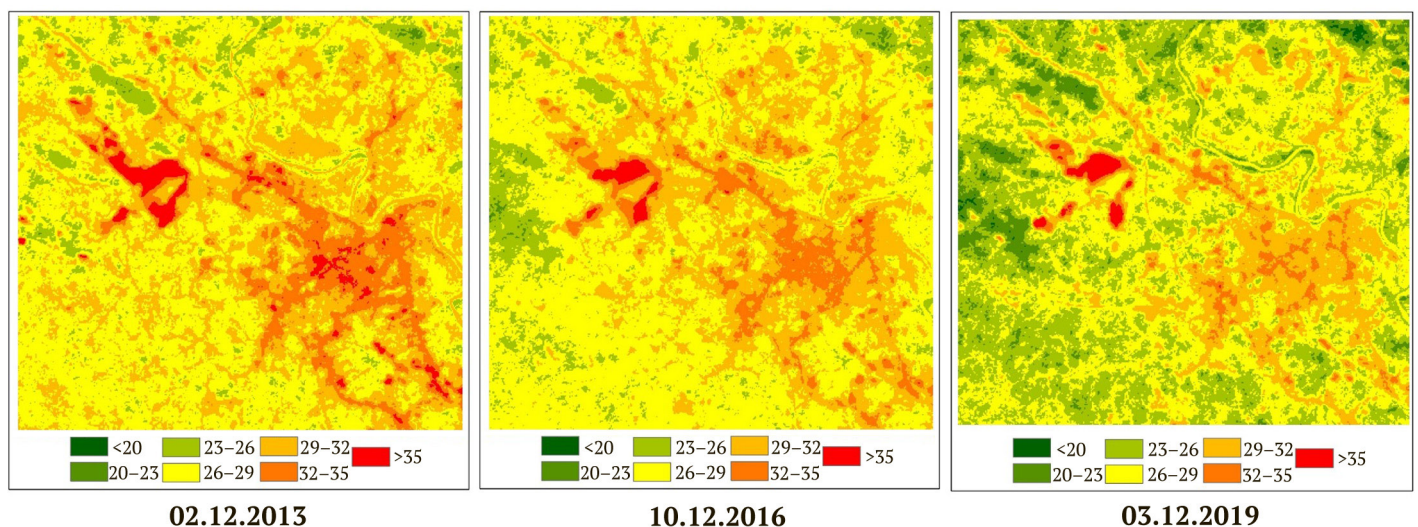


Fig. 7. NDCFI index calculated from Landsat images in the period of 2013–2019





#### 4. Conclusion

Underground coal fires are very dangerous phenomenon in coal mining, greatly affecting the environment and production activities. Early detection of areas with high risk of underground fire is an urgent task; it is necessary to effectively respond to underground coal fires. This paper presents a solution for early detection and monitoring of areas with high risk of underground

coal fire based on NDCFI index calculated from Landsat satellite data. The obtained results showed that NDCFI index has very high correlation with the land surface temperature. Areas with NDCFI values higher than  $-0.22$  practically correspond to areas with land surface temperature above  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Applying NDCFI index allows providing timely information for managers to effectively respond to underground fires in coal mining sector.

#### References

1. Zhang Y., Wang A., Chen L., Liu C. Study of thermal characteristics and functional group changes of Yanghuopan Coal during spontaneous combustion. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2021. <https://doi.org/10.1007/s10973-021-10802-6>
2. Stracher G., Prakash A., Sokol E. Volume 3: Case Studies – Coal Fires. In: Stracher G. B., Prakash A., Sokol E. V. (eds.). *Coal and Peat Fires: A Global Perspective*. Elsevier Science; 2015. <http://doi.org/10.1016/C2010-0-68844-4>
3. Wolf K. H., Bruining J., Meeuwis R. Understanding underground coal fires for utilization. In: 68<sup>th</sup> EAGE Conference and Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2006. 2006. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201402110>
4. Prakash A., Gupta R. P. Surface fires in Jharia coalfield, India – their distribution and estimation of area and temperature from TM data. *International Journal of Remote Sensing*. 1999;20(10):1935–1946. <https://doi.org/10.1080/014311699212281>
5. Mishra R. K., Roy P. N. S., Pandey J., Khalkho A., Singh V.K. Study of coal fire dynamics of Jharia coalfield using satellite data. *International Journal of Geomatics and Geosciences*. 2014;4(3):477–484. URL: [https://www.researchgate.net/publication/281833491\\_Study\\_of\\_coal\\_fire\\_dynamics\\_of\\_Jharia\\_coalfield\\_using\\_satellite\\_data](https://www.researchgate.net/publication/281833491_Study_of_coal_fire_dynamics_of_Jharia_coalfield_using_satellite_data)
6. Chen Y., Li J., Yang B., Zhang S. Detection of coal fire location and change based on multi – temporal thermal remotely sensed data and field measurements. *International Journal of Remote Sensing*. 2007;28(15):3173–3179. <https://doi.org/10.1080/01431160500444889>
7. Cracknell A. P., Mansor S. B. Detection of sub-surface coal fires using Landsat Thematic Mapper data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*. 1992;29:750–753. URL: [https://www.isprs.org/proceedings/XXIX/congress/part7/750\\_XXIX-part7.pdf](https://www.isprs.org/proceedings/XXIX/congress/part7/750_XXIX-part7.pdf)
8. Guha A., Kumar K. Structural controls on coal fire distributions – Remote sensing based investigation in the Raniganj coalfield, West Bengal. *Journal of the Geological Society of India*. 2012;79:467–475. <https://doi.org/10.1007/s12594-012-0071-6>
9. Huo H., Jiang X., Song X., Li Z., Ni Z., Gao C. Detection of coal fire dynamics and propagation direction from multi-temporal nighttime Landsat SWIR and TIR data: A case study on the Rujigou coalfield, Northwest (NW) China. *Remote Sensing*. 2014;6(2):1234–1259. <https://doi.org/10.3390/rs6021234>
10. Liu J., Wang Y., Yan S., Zhao F., Li Y., Dang L., Liu X., Shao Y., Peng B. Underground coal fire detection and monitoring based on Landsat-8 and Sentinel-1 data sets in Miqian fire area, Xinjiang. *Remote Sensing*. 2021;13(6):1141. <https://doi.org/10.3390/rs13061141>
11. Trinh L. H., Zablotskii V. R. The application of Landsat multi-temporal thermal infrared data to identify coal fire in the Khanh Hoa coal mine, Thai Nguyen province, Vietnam. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2017;53(9):1181–1187. <https://doi.org/10.1134/S0001433817090183>
12. Vu D. T., Nguyen T. T. Spatio-temporal changes of underground coal fires during 2008-2016 in Khanh Hoa coal field (North-east of Viet Nam) using Landsat time-series data. *Journal of Mountain Science*. 2018;15(12):2703–2720. <https://doi.org/10.1007/s11629-018-4997-z>
13. Prasun K., Kuntala L., Kanika S. Application of remote sensing to identify coal fires in the Raniganj Coalbelt, India. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2005;8(3):188–195. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2005.09.001>
14. Trinh L. H., Vu V. T., Do T. T. Application of Landsat 8 and Sentinel 2 multi-spatial resolution satellite imageries to determine the land surface temperature in Khanh Hoa coal mine (Thai Nguyen province). *Mining Industry Journal*. 2018;(6):86–90.
15. Luu D. H., Nguyen T. H. L. Renewable energy policies for sustainable development in Vietnam. *VNU Journal of Science: Earth and Environmental Sciences*. 2009;25(3):133–142. URL: <https://js.vnu.edu.vn/EES/article/view/1870>
16. Nguyen T. T., Vu D. T. Use of hot spot analysis to detect underground coal fires from Landsat-8 TIRS data: A case study in the Khanh Hoa coal field, North-East of Vietnam. *Environment and Natural Resources Journal*. 2019;17(3):1–10. <https://doi.org/10.32526/enrj.17.3.2019.17>



17. Raju A. *Remote sensing based coal fire studies in Jharia coalfield, India*. PhD thesis. Indian Institute of Technology Roorkee; 2015. 189 p.

18. Chavez P. Image-based atmospheric corrections—revisited and improved. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 1996;62(9):1025–1036. URL: [https://www.researchgate.net/publication/236769129\\_Image-Based\\_Atmospheric\\_Corrections\\_-\\_Revisited\\_and\\_Improved](https://www.researchgate.net/publication/236769129_Image-Based_Atmospheric_Corrections_-_Revisited_and_Improved)

19. Du C., Ren H., Qin Q., Meng J., Li J. Split-window algorithm for estimating land surface temperature from Landsat 8 TIRS data. In: *IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium*. 2014. Pp. 3578–3581. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2014.6947256>

20. Jiménez-Muñoz J. C., Sobrino J. A., Skoković D., Mattar C., Cristóbal J. LST retrieval methods from Landsat-8 thermal infrared sensor data. In: *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2014;11(10):1840–1843. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2014.2312032>

21. Rongali G., Keshari A.K., Gosain A.K., Khosa R. Split-window algorithm for retrieval of land surface temperature using Landsat 8 thermal infrared data. *Journal of Geovisualization and Spatial Analysis*. 2018;2(2):1–19. <https://doi.org/10.1007/s41651-018-0021-y>

22. Huazhong R., Du C., Qin Q., Liu R. Atmospheric water vapor retrieval from Landsat 8 and its validation. In: *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. 2014. Pp. 3045–3048. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2014.6947119>

23. Sobrino J. A., Jimenez-Munoz J. C., Zarco-Tejada P. J., Sepulcre-Canto G., de Miguel E. Land surface temperature derived from airborne hyperspectral scanner thermal infrared data. *Remote Sensing of Environment*. 2006;102(1-2):99–115. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.02.001>

### Information about the authors

**Le Hung Trinh** – Lecturer, Le Quy Don Technical University, Hanoi, Vietnam; ORCID [0000-0002-2403-063X](https://orcid.org/0000-0002-2403-063X), Scopus ID [57035066200](https://scopus.com/authorid/57035066200); e-mail [trinhlehung@lqdtu.edu.vn](mailto:trinhlehung@lqdtu.edu.vn)

**Viet Nghia Nguyen** – Lecturer, Department of Mine Surveying, Hanoi University of Mining and Geology, Hanoi, Vietnam; ORCID [0000-0001-7010-8613](https://orcid.org/0000-0001-7010-8613), Scopus ID [57204141788](https://scopus.com/authorid/57204141788); e-mail [nguyenvietnghia@humg.edu.vn](mailto:nguyenvietnghia@humg.edu.vn)

### Информация об авторах

**Ле Хунг Чинь** – преподаватель, Технический университет им. Ле Куи Дон, г. Ханой, Вьетнам; ORCID [0000-0002-2403-063X](https://orcid.org/0000-0002-2403-063X), Scopus ID [57035066200](https://scopus.com/authorid/57035066200); e-mail [trinhlehung@lqdtu.edu.vn](mailto:trinhlehung@lqdtu.edu.vn)

**Вьет Нгиа Нгуен** – преподаватель, кафедра маркшейдерского дела, Ханойский горно-геологический университет, г. Ханой, Вьетнам; ORCID [0000-0001-7010-8613](https://orcid.org/0000-0001-7010-8613), Scopus ID [57204141788](https://scopus.com/authorid/57204141788); e-mail [nguyenvietnghia@humg.edu.vn](mailto:nguyenvietnghia@humg.edu.vn)

Received 13.09.2021

Revised 22.11.2021

Accepted 01.12.2021

Поступила в редакцию

Поступила после рецензирования

Принята к публикации

13.09.2021

22.11.2021

01.12.2021





## MINE SURVEYING

Research article

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-4-241-251>

## Prediction of ground subsidence due to underground mining through time using multilayer feed-forward artificial neural networks and back-propagation algorithm – case study at Mong Duong underground coal mine (Vietnam)

Q. L. Nguyen<sup>1</sup> , Q. M. Nguyen<sup>1</sup> , D. T. Tran<sup>2</sup> , X. N. Bui<sup>1</sup> <sup>1</sup> Hanoi University of Mining and Geology, Hanoi, Vietnam<sup>2</sup> Hanoi University of Civil Engineering, Hanoi, Vietnam [nguyenquoclong@humg.edu.vn](mailto:nguyenquoclong@humg.edu.vn)

### Abstract

The paper is devoted to studying the possibility of using artificial neural networks (ANN) to estimate ground subsidence caused by underground mining. The experiments showed that the most suitable network structure is a network with three layers of perceptrons and four neurons in the hidden layer with the back propagation algorithm (BP) as a training algorithm. The subsidence observation data in the Mong Duong underground coal mine and other parameters, including: (1) the distance from the centre of the stope to the ground monitoring points; (2) the volume of mined-out space; (3) the positions of the ground points in the direction of the main cross-section of the trough; and (4) the time (presented by cycle number), were used as the input data for the ANN. The findings showed that the selected model was suitable for predicting subsidence along the main profile within the subsidence trough. The prediction accuracy depended on the number of cycles used for the network training as well as the time interval between the predicted cycle and the last cycle in the training dataset. When the number of monitoring cycles used for the network training was greater than eight, the largest values of *RMS* and *MAE* were less than 10 % compared to the actual maximum subsidence value for each cycle. If the network training was less than eight cycles, the results of prediction did not meet the accuracy requirements.

### Keywords

underground mining, subsidence trough, subsidence prediction, artificial neural network, back propagation

### For citation

Nguyen Q. L., Nguyen Q. M., Tran D. T., Bui X. N. Prediction of ground subsidence due to underground mining through time using multilayer feed-forward artificial neural networks and back-propagation algorithm – case study at Mong Duong underground coal mine (Vietnam). *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021;6(4):241–251. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-4-241-251>

## МАРКШЕЙДЕРИЯ

Научная статья

## Прогнозирование просадки грунта в результате подземной добычи с использованием многослойных искусственных нейронных сетей с прямой связью и алгоритма обратного распространения – исследование на примере подземного угольного рудника Монг Дуонг (Вьетнам)

К. Л. Нгуен<sup>1</sup> , К. М. Нгуен<sup>1</sup> , Д. Т. Тран<sup>2</sup> , Х. Н. Буй<sup>1</sup> <sup>1</sup> Ханойский университет геологии и горного дела, г. Ханой, Вьетнам<sup>2</sup> Ханойский университет гражданского строительства, г. Ханой, Вьетнам [nguyenquoclong@humg.edu.vn](mailto:nguyenquoclong@humg.edu.vn)

### Аннотация

Статья посвящена изучению возможности использования искусственных нейронных сетей (ИНС) для оценки просадки грунта, вызванной подземной добычей. Эксперименты показали, что наиболее подходящей структурой сети является сеть с тремя слоями перцептронов и четырьмя нейронами в скрытом слое с алгоритмом обратного распространения в качестве алгоритма обучения. Данные наблюдения за просадкой грунта на подземном угольном руднике Монг Дуонг и другие параметры, включающие: 1 – расстояние от центра штрека до точек наземного мониторинга; 2 – объем выработанного пространства; 3 – положение наземных точек в направлении главного сечения мульды просадки; и 4 – время (представленное номером цикла), были использованы в качестве входных данных для ИНС. Результаты показали, что выбранная модель приемлема для прогнозирования просадки вдоль главного сечения



(профиля) в пределах мульды просадки. Точность прогнозирования зависела от количества циклов, использованных для обучения нейронной сети, а также от временного интервала между прогнозируемым циклом и последним циклом в наборе данных для обучения. Когда количество циклов мониторинга, использованных для обучения сети, превышало восемь, наибольшие значения RMS (среднеквадратическая погрешность) и MAE (средняя абсолютная ошибка) составляли менее 10 % от фактического максимального значения просадки для каждого цикла. Если число циклов обучения сети было меньше восьми, результаты прогнозирования не соответствовали требованиям по точности.

#### Ключевые слова

подземная разработка полезных ископаемых, мульда просадки, прогнозирование просадки, искусственная нейронная сеть, обратное распространение

#### Для цитирования

Nguyen Q. L., Nguyen Q. M., Tran D. T., Bui X. N. Prediction of ground subsidence due to underground mining through time using multilayer feed-forward artificial neural networks and back-propagation algorithm – case study at Mong Duong underground coal mine (Vietnam). *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021;6(4):241–251. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-4-241-251>

## 1. Introduction

Underground mining produces large goaf that unbalances natural stress in the ground. Then gravity forces the soil and rock above to tend towards filling the goaf below to achieve a new equilibrium [1]. This filling process causes ground subsidence with formation of a subsidence trough, which is dangerous to natural and man-made structures located on the surface. Therefore, special interest is paid to monitoring and prediction of subsidence within mining areas in the world [2–4] and in Vietnam [5].

Based on the development of computer science, the studies of ground subsidence prediction with the use of Artificial Neural Network (ANN) were performed by many authors. Ambrožič & Turk [2] first published the results of prediction of subsidence due to underground coal mining at the Velenje mine, Slovenia, using a 2-layer direct transmission ANN. Hejmanowski & Witkowski [6] published the study on application of ANN for mining-caused surface deformation prediction in Poland. Zhao & Chen [7] presented the results of ANN application in prediction of surface deformation at metal mines in China. The study of Yang & Xia [4] presented the subsidence prediction for mines with thin rock layer below and thick soil layer above the productive strata. K. D. Kim et al. [8] studied and predicted the ground surface subsidence in Samcheok city due to the coal mine operation. Y. Kim et al. [9] developed an ANN model to predict the subsidence caused by mining activities using the results of survey of 247 subsidence areas at 27 mines for training and validation of their ANN model. Lee et al. [10] used the input data including topography, geology, mining methods etc., for ANN training and creating the map of ground surface subsidence prediction in an underground mining area. These studies were mainly devoted to estimation of subsidence at the final stage of the displacement process, i.e. description of the subsidence trough in its final static phase, while studying the ground surface subsidence process through time will allow the early warning of deformations on the surface. However, the studies on application of ANN in predicting the subsidence through time are not available.

The studies of ground surface subsidence prediction through time mostly use mathematical models, in which

the exponential function proposed by Knothe is mostly applicable due to its advantage of allowing predicting the subsidence of monitoring points on the surface through time [11–13]. However, the ground surface subsidence due to underground mining is a complicated process, and it cannot be fully described by the Knothe function, so the accuracy of subsidence prediction is not rather high in some cases [12, 14]. To overcome this problem, several extension forms of Knothe function were proposed [13, 15], e.g. adding a parameter to this function to describe the most realistic subsidence process and thereby optimising subsidence prediction [12, 15]. Gonzalez-Nicieza et al. [16] used the prediction function of Knothe-Sroka-Schober to develop a new prediction function and applied it to the Central Asturian coal basin. Their subsidence prediction results proved to be close to the actual subsidence observations. Liu et al. [17] developed the function for subsidence prediction through time on the basis of Harris function and achieved more accurate results compared to applying the original Harris function.

The above studies on ground surface subsidence prediction through time focussed mainly on the prediction for each monitoring point. Its advantage is suitability for the prediction of subsidence under structures on the surface, but the disadvantage is the subsidence prediction at the monitoring point only, while the subsidence in any other point is interpolated from the subsidence in the monitoring points. To overcome these limitations applying ANN was suggested to predict subsidence as well as determine the subsidence value in any points in the subsidence trough at any time. With the advantage of being a non-model based method, ANN is easy to test and modify using different groups of input parameters. Thus, ANN seems to be the most suitable method for predicting and interpolating surface subsidence through time in mining areas, especially at underground coal mines such as in Quang Ninh, Vietnam.

Depending on the availability of training data, ANN can be used to predict subsidence in many cases such as predicting subsidence in the planning phase or predicting subsidence in the mining phase. For the case of predicting in the planning phase, a lot of training data on many different mining condition parameters is needed. With such training data ANN is capable to be predictable



during mining phase too. However, it is quite difficult to collect such training data nowadays.

In this study, we tested the prediction of subsidence at underground mines through time during mining phase using training data, consisted of data of historical subsidence monitoring at Mong Duong underground coal mine (Quang Ninh, Vietnam). The testing results allowed evaluating the effect of the number of training cycles as well as the ANN ability to predict surface subsidence at underground coal mines in Quang Ninh area.

## 2. Function of subsidence prediction for Multi-Layer Perceptron ANN

The most widely used ANN model is the Multi-Layer Perceptron (MLP) (Fig. 1). A general MLP is a network with nodes, or neurons, connected to each other and placed in  $n$  layers, including the input layer (which was not taken into account in some studies), the output layer ( $n^{\text{th}}$  layer) and the hidden layer ( $n - 1$ ). The input neurons are not neurons in a very real sense, because they do not perform any computations with the input data, but they simply accept the input data and transmit them to the next layer [18]. The neurons of the following layer are connected with and receive data from the neurons of the previous layer (the data are not transmitted in the opposite direction, so this network is called “feed-forward neural network”).

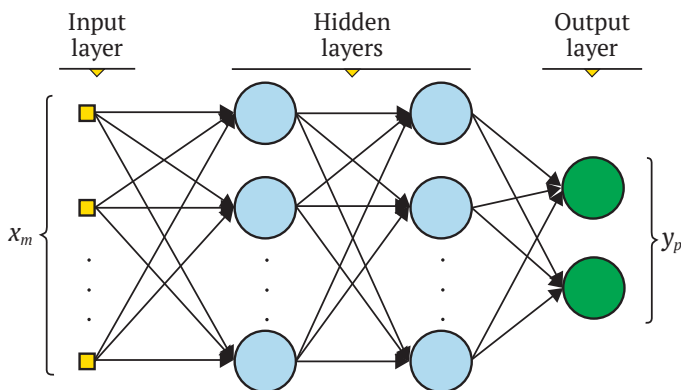


Fig. 1. Feed-forward neural network

<https://www.intechopen.com/chapters/51131>

In a multilayer feed-forward neural network, the output value of one layer becomes the input value for the next layer. The output value of each neuron is defined as follows:

$$y_i^{(l)} = f \left[ \sum_{j=1}^{N_{l-1}} \omega_{ij}^{(l, l-1)} y_j^{(l-1)} + b_i \right]. \quad (1)$$

In which:

$y_i^{(l)}$  is the output value of the  $i^{\text{th}}$  neuron in layer  $l$  ( $l = 1, \dots, L$  and  $i = 1, \dots, N_l$ ),

$\omega_{ij}^{(l, l-1)}$  is the weight that links the  $j^{\text{th}}$  neuron of class  $l - 1$  to the  $i^{\text{th}}$  neuron of class  $l$ .

The function  $f$  is chosen based on specific requirements. In subsidence prediction, a sigmoid function is often used (Eq. 2) because of smoothness of this function. Furthermore, this function is especially convenient for using in ANNs training by back-

propagation algorithm, because it is easy to derive, and the amount of computations in the training process can be significantly reduced.

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}. \quad (2)$$

When all the neurons in a layer have completed their computations, the next layer can start the computations, because the outputs of the previous layer are combined with the associated weights and become the inputs for the next layer. When all the neurons have completed the computations then the output neurons produce the result. In order to get the desired outputs, in the training data and training process, the associated weights of the neural network should be adjusted. The algorithms that determine the associated weights of the cycle data are called network training algorithms. Among these algorithms, the most popular one for MLP networks is back-propagation algorithm [19].

Same to feed-forward neural networks used for other purposes, the feed-forward neural network used in surface subsidence prediction in the mining area consists of 3 layers, including: input layer, hidden layer, and output layer. The input layer consists of neurons, each of which receives an input value that is a factor influencing the surface subsidence. The hidden layer consists of neurons that determine general relationship between the parameters influencing the surface subsidence. The output layer has only one neuron and the output value of this neuron is the predicted subsidence value. These three layers are connected: all the neurons of the input layer are connected to each neuron of the hidden layer, and these connections are represented by associated weights in the network training process. Similarly, each neuron of the hidden layer is connected to the neuron of the output layer.

## 3. Selection of input data for ANN in ground surface subsidence prediction through time

The parameters influencing the surface deformation process are topography, soil and rock mechanical properties, thickness and dip angle of the coal seam, average mining depth, etc. Among these parameters, soil and rock mechanical properties commonly do not change through time in the same mining area, so they are not selected as input factors [20].

The parameters of topography, coal seam dip angle, average mining depth are characterized by the distance from the center of a stope to the monitoring points on the surface at the time of subsidence monitoring. The size of coal mining stope (underground working) changes through time, so the distance from its center to the monitoring points on the surface also changes. The symbol for this distance between monitoring point  $i^{\text{th}}$  and the center at subsidence monitoring time  $T$  is  $L_i^t$ .

The factors of average thickness of the coal seam, shape and size of the stope and mining progress are characterized by the volume of the mining stope (or the volume of coal extracted) through time are denoted as  $V_t$ .

The coordinates of the monitoring points  $i$  on the main profiles of the subsidence trough are  $(X_i, Y_i)$  in the coordinate system whose origin is the center of the subsidence trough (this center is determined based on the maximum subsidence angle  $(\theta)$  or subsidence monitoring data). In the direction of the coal seam dip, the coordinates of the monitoring point are  $Y_i = 0, X_i \neq 0$  ( $X_i$  is negative at points located on the opposite slope of the subsidence trough and vice versa). In the strike direction, the coordinates of the monitoring point are  $X_i = 0, Y_i \neq 0$  ( $Y_i$  is negative at points located in the direction of the mining starting and vice versa). The monitoring time is an important input parameter; as time goes on, other parameters such as the distance from the center of a coal mining stope to monitoring points on the surface and the volume of the stope (coal extracted) change. The symbol  $T_i$  is time of subsidence monitoring in  $i^{th}$  cycle,  $T_i + n$  is the time of subsidence prediction ( $n$  is the time interval between subsidence monitoring cycles).

Thus, 4 input parameters selected for ANN in predicting underground mining-caused ground subsidence through time include: monitoring time ( $T_i$ ), volume of coal stope ( $V_i$ ), distance from the center of the coal stope to monitoring points on the surface ( $L_i^{t_i}$ ), and coordinates of the monitoring points on the surface ( $Y_i$ ) (Fig. 2).

#### 4. Selection of ANN architectural parameters

For improving the accuracy of the prediction results, the number of the ANN hidden layers should be increased, but this will complicate the ANN structure, increase the training time and the associate weight computation time [7]. Selecting the number of hidden layers depends on

the ANN structure and the number of training cycles. If the number of training cycles is small and the number of hidden layers is large, the ANN is characterized by overfitting. In subsidence prediction, due to the small number of training data, the ANN with a hidden layer is evaluated as the most suitable [21].

For the feed-forward ANN subsidence prediction model, it is easier to determine and adjust the number of neurons in each hidden layer than to increase the number of hidden layers. Determining the number of neurons in the hidden layer is important in forming the ANN architecture. Although hidden layers do not directly interact with the inputs, they greatly influence the outputs. Therefore, the selection of the number of hidden layers and the number of neurons in a hidden layer should be carefully considered. Although the hidden layers do not directly interact with the inputs, they greatly influence the output. Therefore, selecting the number of hidden layers and the number of neurons in the hidden layer must be carefully considered. If the number of neurons in the hidden layer is too small, the ANN will be underfitted (underfitting is a phenomenon when the ANN predicts inaccurately even on the training data). Conversely, if the number of neurons in a hidden layer is too great, the ANN may suffer from some problems such as too large training time, overfitting (overfitting is a phenomenon when the ANN prediction is very accurate with training data, but less accurate with actual data). The common methods for determining the number of neurons in a hidden layer are as follows [22]:

- The number of neurons in each hidden layer should be between the number of neurons in the input and output layers.

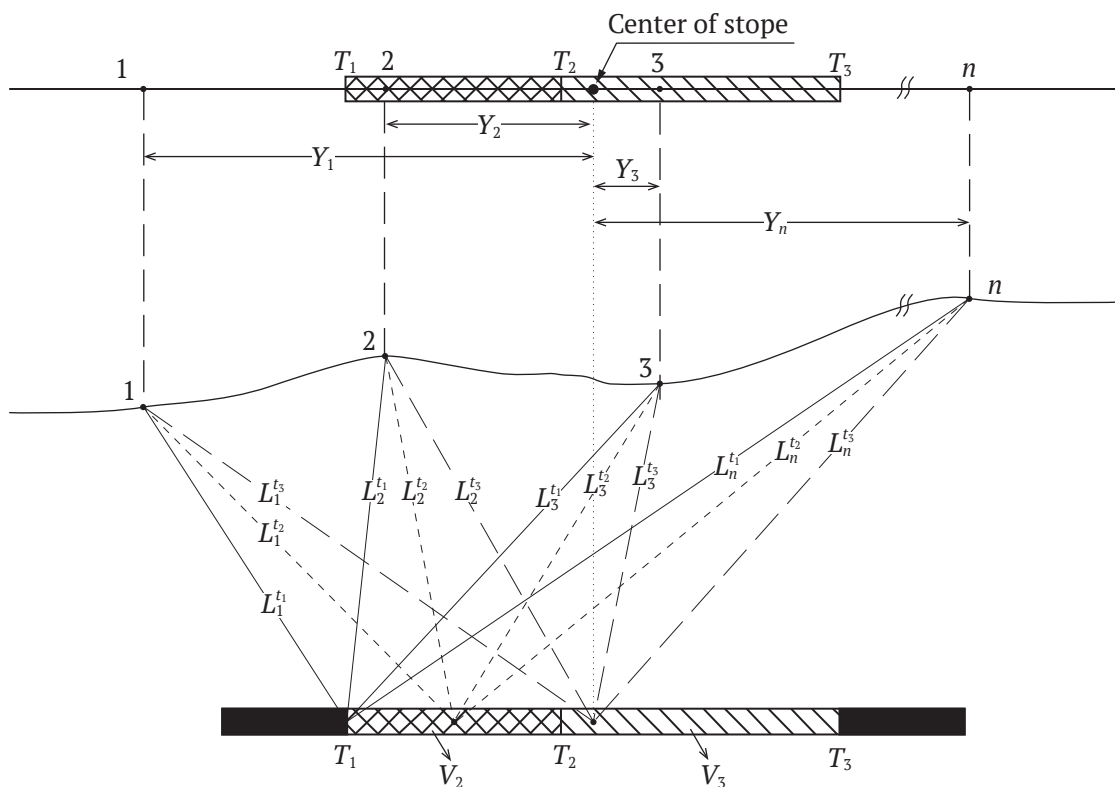


Fig. 2. ANN input parameters



- The number of neurons in each hidden layer should be equal to two-thirds of the sum of the number of neurons in the input and output layers.
- The number of neurons in each hidden layer should be calculated by the following formula [23]:

$$i \leq 1 + \sqrt{m(l+3)}, \quad (4)$$

where:  $m$  is the number of training cycles,  $l$  is the number of hidden layers.

In this study, the selected feed-forward neural network for the prediction of surface subsidence through time at Mong Duong underground coal mine has 1-hidden layer ANN architecture with 4 neurons in the hidden layer. Thus, the input layer consists of 4 neurons, each of which represents a parameter: monitoring time ( $T_i$ ), volume of stope (coal extracted) ( $V_i$ ), distance from the center of the coal extraction stope to monitoring points on the surface ( $L_i^d$ ), and coordinates of the monitoring points on the surface ( $Y_i$ ). The hidden layer also consists of 4 neurons that determines the general relationship between the parameters influencing the mine surface subsidence. The output layer has only one neuron and its output is the predicted subsidence value (Fig. 3).

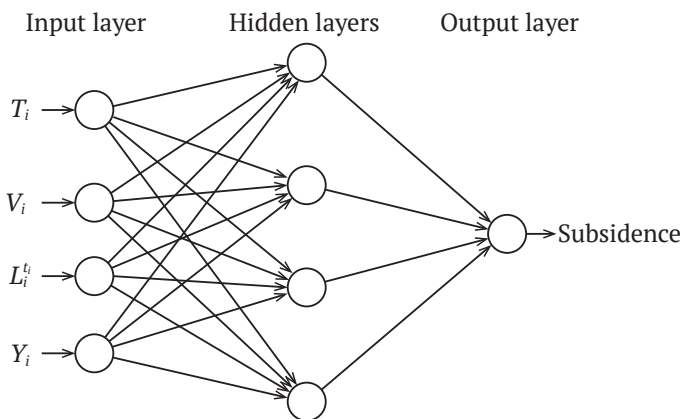


Fig. 3. Architecture of ANN for subsidence prediction

### 5. Training feed-forward ANN

The ANN training data includes collected data and subsidence monitoring data along monitoring line P, the main cross-section of the subsidence trough, located above stope No. 2 in coal seam No. 9 of North Mong Duong at Mong Duong underground coal mine. Coal extraction in stope No. 2 started in the second quarter of 2013 and was completed in the second quarter of 2014.

The monitoring line  $P$  in the direction of extraction propagation was arranged with 22 monitoring points. The distance between them ranges 10 to 30 m. The subsidence monitoring was carried out for 2 years with a 2-month cycle (total of 12 monitoring cycles), using a Leica NAK2 automatic level which meets the mine surveying technical requirements. The elevations of the monitoring points were measured against the benchmark of class IV levelling accuracy. After completion of the monitoring in 2014, the mine surface was re-surveyed to ensure accurate determination of the maximum subsidence value. After stopping the

cyclical subsidence monitoring, the mine surface was re-monitored to ensure accurate determination of the maximum subsidence value.

The cyclical subsidence monitoring data and 4 input parameters (the extraction volume, the distance from the stope center to the monitoring points on the surface, the coordinates of the monitoring points and the time) corresponding to these cycles formed the training and validation data files. The subsidence monitoring data of the remaining cycles were used to test and evaluate the subsidence prediction accuracy of the ANN.

The ANN for ground surface subsidence prediction through time was trained in 5 cases as follows:

Case 1: Using the data of the first 11 cycles for training; the subsidence in the last cycle was used to evaluate the ANN prediction accuracy.

Case 2: Using the data of the first 10 cycles for training, the subsidence in the next 2 cycles was used to evaluate the prediction accuracy of the ANN.

Case 3: Using the data of the first 9 cycles for training, the subsidence in the next 3 cycles was used to evaluate the ANN prediction accuracy.

Case 4: Using the data of the first 8 cycles for training, the subsidence in the next 4 cycles was used to evaluate the ANN prediction accuracy.

Case 5: Using the data of the first 7 cycles for training, the subsidence in the next 5 cycles was used to evaluate the the ANN prediction accuracy.

The described training and prediction data of the monitoring cycles are shown in Table 1.

Table 1

ANN training and prediction

Case	Monitoring cycles for training	Monitoring cycles for prediction
1	1, 2, 3, ..., 9, 10, 11	12
2	1, 2, 3, ..., 8, 9, 10	11, 12
3	1, 2, 3, ..., 7, 8, 9	10, 11, 12
4	1, 2, 3, ..., 6, 7, 8	9, 10, 11, 12
5	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7	8, 9, 10, 11, 12

In all the 5 cases, the data of the first cycles used to build the predictive model were randomly divided in the proportion of 60 %, 20 %, and 20 % corresponding to the training files, validation files, and testing files, respectively.

The training data set (Fig. 4) is in MS Excel format with 5 columns (corresponding to 4 input parameters and the monitored subsidence values in the monitoring points) and many rows (the number of rows depends on the training data amount).

The training and prediction data were normalized using formula (5):

$$y = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}, \quad (5)$$

where:  $x$ ,  $y$  are the pre-normalized and post-normalized values of the input parameters, respectively;  $x_{\max}$  and  $x_{\min}$  are the pre-normalized maximum and minimum values of each input parameter.



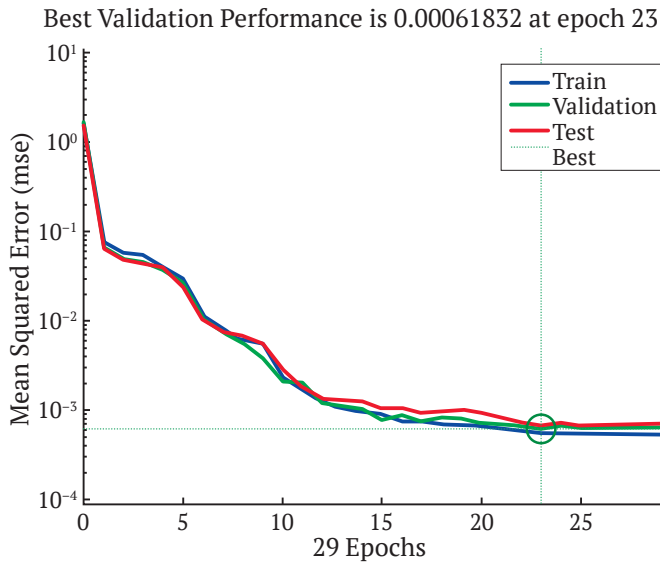
	A	B	C	D	E
	Cycle (months)	Volume (m3)	Distance (m)	Coordinate Y (m)	Monitored subsidence (mm)
1					
2	0	0.0	129.9	-194.0	0
3	0	0.0	103.8	-150.0	0
4	...	...	...	...	...
5	2	13000.0	135.2	-194.0	0
6	2	13000.0	107.3	-150.0	0
7	...	...	...	...	...
8	4	26000.0	233.6	156.0	-7
9	4	26000.0	254.9	180.0	-23
10	...	...	...	...	...
11	8	52000.0	207.8	156.0	-51
12	8	52000.0	228.6	180.0	-34
13	...	...	...	...	...
14	10	65000.0	194.6	156.0	-12
15	10	65000.0	215.1	180.0	-9
16	...	...	...	...	...
17	12	78000.0	182.1	156.0	-18
18	12	78000.0	202.2	180.0	-16

Fig. 4. Structure of training data file in MS Excel format

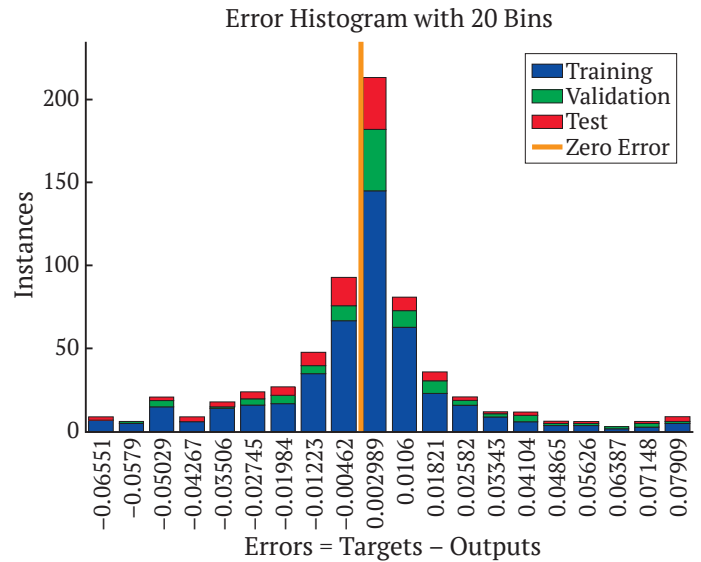
We have built the model based on Matlab platform (version R2016a) for ANN training and ground surface subsidence prediction in underground mining areas. In this modular programming, we used some neural network functions in the Neural Network Toolbox of Matlab, which gave reliable results and saved programming time.

The training process of the feed-forward ANN for subsidence prediction gave good results at all 3 stages: training, validation, and testing. In the first 4 cases, the output errors were tiny and gradually tended to approaching "0", as shown in Fig. 5, a (training, validation, and testing error curves), Fig. 5, b (histograms of training, validation, and testing errors) and Fig. 6 (coefficients of correlation between the predicted subsidences and the actual subsidences).

This all showed that that the feed-forward ANN was successfully trained and ready for subsidence prediction.

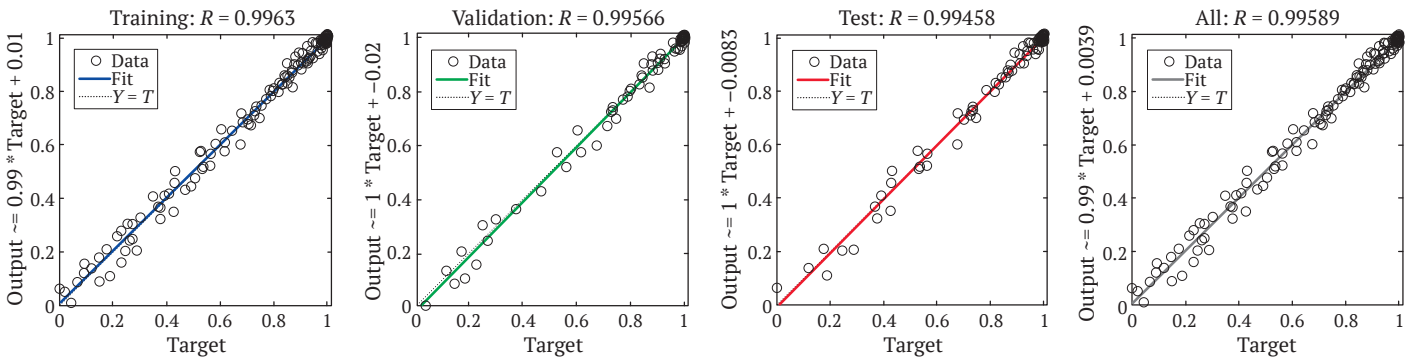


(a)



(b)

Fig. 5. (a) Error curve for ANN training (b) Error histogram for ANN training



(a)

(b)

(c)

(d)

Fig. 6. Coefficients of correlation between the feed-forward ANN predicted subsidences and the actual subsidences: (a) for training data, (b) for validation data, (c) for testing data, and (d) for all the data



**6. Evaluation of subsidence prediction accuracy**

The accuracy of the subsidence prediction based on feed-forward ANN was evaluated using the mean absolute error (*MAE*), root mean square (*RMS*), and coefficient of correlation (*r*) between the monitored subsidence (actual subsidence) and the predicted subsidence:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\eta_i - \eta_i^p)^2}, \tag{6}$$

$$MAE = \sum_{i=1}^n \frac{|\eta_i - \eta_i^p|}{n}, \tag{7}$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (\eta_i - \bar{\eta}_l)(\eta_i^p - \bar{\eta}_l^p)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\eta_i - \bar{\eta}_l)^2 (\eta_i^p - \bar{\eta}_l^p)^2}}, \tag{8}$$

where:  $\eta_i$  and  $\eta_i^p$  are actual subsidence and predicted subsidence, respectively;  $\bar{\eta}_l$  and  $\bar{\eta}_l^p$  are mean of actual subsidence and predicted subsidence, respectively.

**7. Results and discussion**

The trained feed-forward ANN was used to predict the subsidence in 22 points on monitoring line *P* in several cycles. In more details, case 1 predicted the subsidence in cycle 12; case 2 predicted the subsidence in cycles 11 and 12; case 3 predicted the subsidence in cycles 10, 11, and 12; case 4 predicted the subsidence in cycles 9, 10, 11, and 12; and case 5 predicted the subsidence in cycles 8, 9, 10, 11, and 12.

If we let the neural network (ANN) to continuously predict the subsidence, and the training data are available for the first cycles only, the ANN will continue to predict the subsidence while the subsidence process may stop (when the mine/the coal mining stope is no longer exploited). We solved this problem by using training data, namely,

subsidence monitoring data from other subsidence troughs in the mining area. The more subsidence troughs were used to train the ANN, the better and more accurate subsidence prediction was produced by the ANN.

The predicted subsidences were compared with the monitored subsidences in the corresponding cycles. The accuracy of the subsidence prediction results was evaluated based on *MAE*, *RMS* and *r* values (formulas 9, 10, and 11) for all monitoring points in the same cycle. The results of the accuracy evaluation for the 5 cases were as shown in Table 2.

Table 2

Evaluation of subsidence prediction accuracy				
Case	Cycle	RMS (m)	MAE (m)	r
1	12	0.035	0.030	0.995
2	11	0.031	0.023	0.995
	12	0.036	0.027	0.993
3	10	0.026	0.018	0.996
	11	0.031	0.021	0.996
4	12	0.041	0.028	0.994
	9	0.020	0.013	0.997
	10	0.043	0.032	0.990
	11	0.071	0.050	0.977
5	12	0.081	0.059	0.967
	8	0.107	0.095	0.996
	9	0.156	0.132	0.922
	10	0.171	0.137	0.899
	11	0.189	0.152	0.898
	12	0.197	0.160	0.999

**Case 1:** the errors of subsidence prediction *RMS* = 0.035m and *MAE* = 0.030m were equivalent to 4.3% and 3.7 %, respectively, of the maximum subsidence in cycle 12 (which was equal to -0.814m). The coefficient of correlation (*r*) between the actual subsidence and the predicted subsidence in cycle 12 was 0.995. Figure 7 shows the actual and predicted subsidence curves in cycle 12.

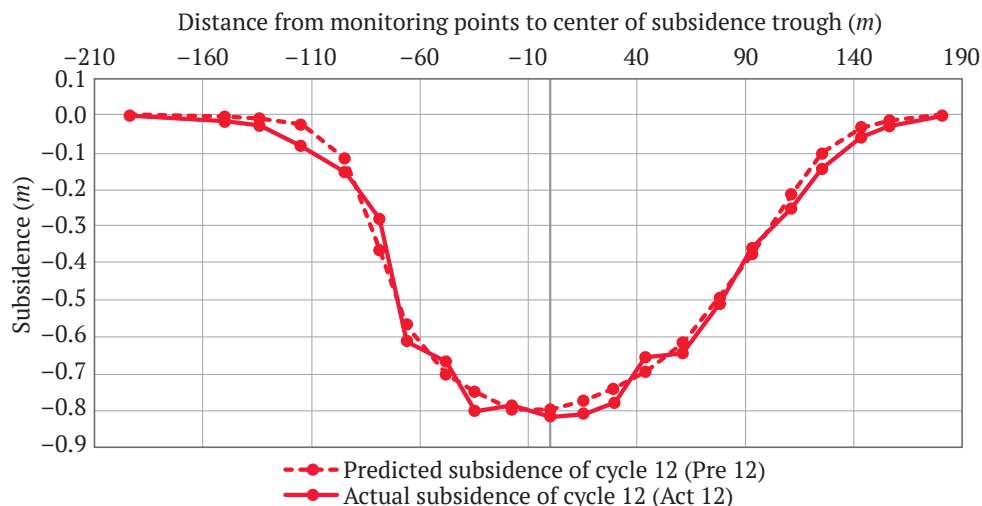


Fig. 7. Actual and predicted subsidence curves in cycle 12 (Case 1)



**Case 2:** in cycle 11, the errors of subsidence prediction  $RMS = 0.031m$  and  $MAE = 0.023m$  were equivalent to 4.1 % and 3.0 %, respectively, of the maximum subsidence in cycle 11 (which was equal to  $-0.686m$ ). The coefficient of correlation  $r = 0.995$ . In cycle 12,  $RMS = 0.036m$ ,  $MAE = 0.027m$  were equivalent to 4.4 % and 3.3 %, respectively, of the maximum subsidence in cycle 12. The correlation coefficient  $r = 0.993$ . Figure 8 shows the actual and predicted subsidence curves in cycles 11 and 12.

**Case 3:** in cycle 10, the errors of subsidence prediction  $RMS = 0.026m$  and  $MAE = 0.018m$  were equivalent to 3.6 % and 2.5 %, respectively, of the maximum subsidence in cycle 10 (which was equal to  $-0.580m$ ). In cycle 11,  $RMS = 0.031m$ ,  $MAE = 0.021m$  were equivalent to 3.9 % and 2.6%, respectively, of the maximum subsidence in cycle 11. In cycle 12,  $RMS = 0.041m$ ,  $MAE = 0.028m$  were equivalent to 5.0 % and 3.4 %, respectively, of the maximum subsidence in cycle 12. The correlation coefficients in all 3 cycles were very close to 1, namely, 0.999, 0.996, and 0.994 in cycle 11, cycle 12, and cycle 13, respectively. Figure 9 shows the actual and predicted subsidence curves in cycles 10, 11, and 12. Thus, in all 3 cycles, the  $MAE$  and  $RMS$  characterizing the accuracy of subsidence prediction

were tiny, and the predicted and actual subsidence curves proved to be very close to each other. This clearly demonstrated that the subsidence prediction results were characterized by rather good accuracy.

**Case 4:** in cycle 9, the errors of subsidence prediction  $RMS = 0.020m$  and  $MAE = 0.013m$  were equivalent to 3.0 % and 2.0 %, respectively, of the maximum subsidence in cycle 9 (which was equal to  $-0.461m$ ). In cycle 10,  $RMS = 0.043m$  and  $MAE = 0.032m$  sequentially equivalent to 5.9 % and 4.4 % of the maximum subsidence of cycle 10. In cycle 11,  $RMS = 0.071m$ ,  $MAE = 0.050m$  were equivalent to 9.3 % and 6.6 %, respectively, of the maximum subsidence in cycle 11. In cycle 12,  $RMS = 0.081m$ ,  $MAE = 0.059m$  were equivalent to 9.9 % and 7.3 %, respectively, of the maximum subsidence in cycle 12. The correlation coefficients  $r$  in these 4 cycles were different. The correlation coefficients  $r$  were 0.997 and 0.995, very close to 1, in cycles 9 and 10, respectively, and gradually decreased in cycles 11 and 12 to 0.977 and 0.967, respectively.

We see that the values of  $MAE$  and  $RMS$  of the subsidence prediction in cycles 9 and 10 were tiny, but increased in cycles 11 and 12. Simultaneously, the correlation coefficient was high in cycle 9 and gradually

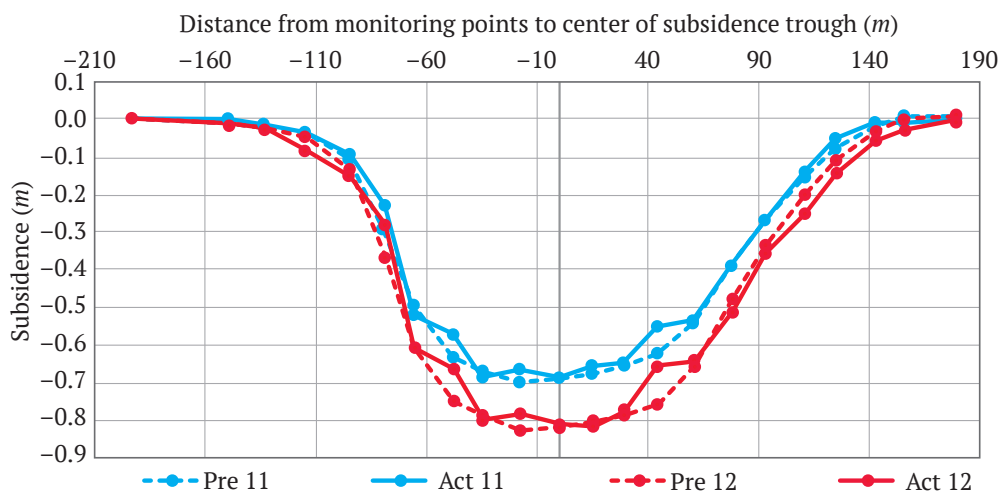


Fig. 8. Actual and predicted subsidence curves in cycles 11 and 12 (Case 2)

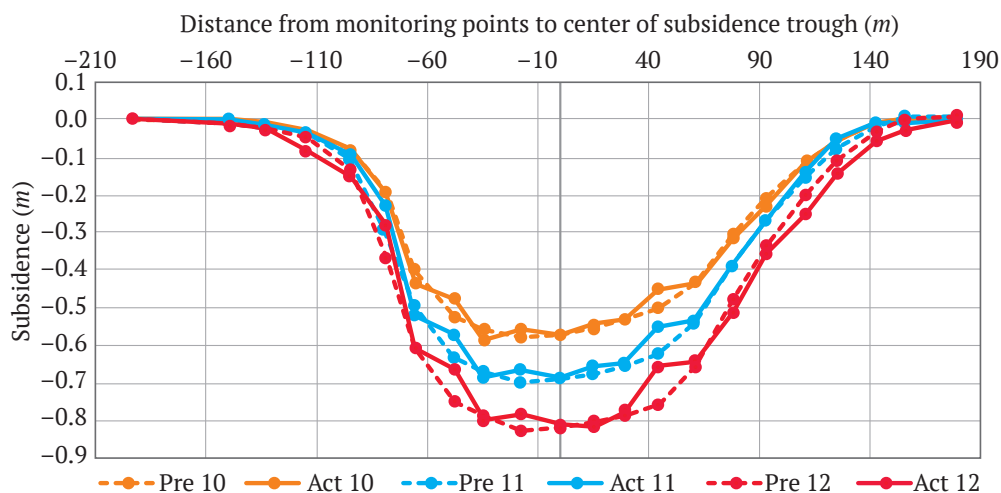


Fig. 9. Actual and predicted subsidence curves in cycles 10, 11, 12 (Case 3)



decreased for cycles 10, 11, and 12. These showed that the predicted subsidence error increases with increasing the period lasted from the monitoring cycles (used to train the ANN) time to the prediction time.

Figure 10 shows that predicted and actual subsidence curves are very close to each other in cycles 9, 10, and 11, demonstrating that the predicted subsidences have high accuracy.

Analysis of the results of cases 3 and 4 showed that, although the number of subsidence monitoring cycles used to train the ANN was large (at least 8 cycles), we should use the ANN to predict the subsidence for the next 3 cycles only, and then should continue monitoring to update the ANN model input parameters to ensure the prediction accuracy.

**Case 5:** in cycle 8, the errors of subsidence prediction  $RMS = 0.107m$  and  $MAE = 0.095m$  were equivalent to 31.4 % and 11.8 %, respectively, of the maximum subsidence in cycle 8 (which was equal to  $-0.341m$ ). This was the most accurate subsidence prediction result in case 5, while even its prediction accuracy was much inferior of that in cases 1, 2, 3, and 4. The reason of this insufficient accuracy was that the number of monitoring cycles (used

for the ANN training) in case 5 was only 7, less than that used in cases 1, 2, and 3.

In cycles 9, 10, 11, and 12, the values of  $RMS$  and  $MAE$  were larger than those in cycle 8. For instance,  $RMS$  values in cycles 9, 10, 11, and 12 were 33.8 %, 29.5 %, 32.6 %, and 33.9 %, respectively, of the maximum subsidence. Similarly,  $MAE$  values in cycles 9, 10, 11, and 12 were 28.6 %, 23.6 %, 26.2%, and 27.6 %, respectively, of the maximum subsidence. The correlation coefficients in all the cycles were much lower than those in the previous four cases. Figure 11 shows that, in all the cycles, the predicted and actual subsidence curves differ markedly from each other.

It can be seen that if we would like to predict the subsidence with high accuracy, we should use at least 8 cycles as ANN training data. However, if many monitoring cycles are used as the training data, only few cycles further can be predicted, providing low practical significance of the subsidence prediction through time. At the same time, to improve subsidence prediction through time, it is expedient to use more data of other similar subsidence troughs in the same mining area as ANN training data.

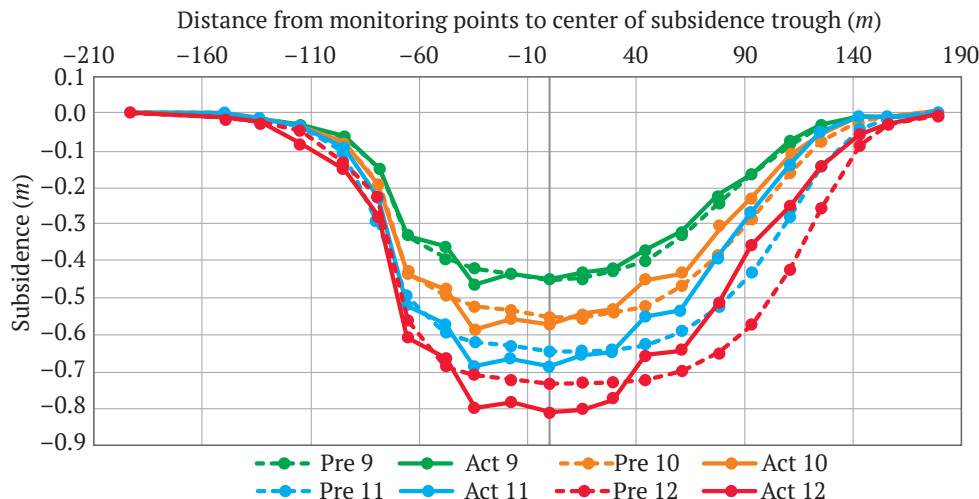


Fig.10. Actual and predicted subsidence curves in cycles 9, 10, 11, and 12 (Case 4)

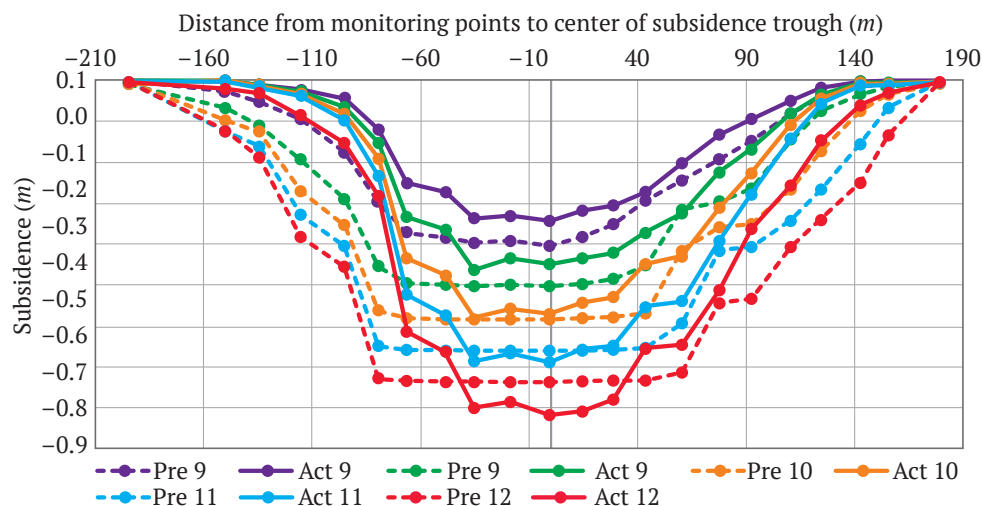


Fig. 11. Actual and predicted subsidence curves in cycles 8, 9, 10, 11, and 12 (Case 5)



## 8. Conclusion

The three-layer feed-forward neural network applying back-propagation algorithm, the most common training algorithm, form a suitable ANN model to predict subsidence of monitoring points located on the surface along the main profile within a subsidence trough in underground coal mining area.

The quality (accuracy and reliability) of the subsidence prediction in the area of Mong Duong underground coal mine depended on the number of ANN training monitoring cycles as well as the time interval between the cycles to be predicted and the last monitoring cycle used to train the neural network. When the number of the monitoring cycles used for training the neural network was greater than 8, the subsidence prediction results were very accurate. This was demonstrated by closeness of the predicted subsidence curves to the actual subsidence curves, as well as by the corresponding values of *RMS*, *MAE*, and the coefficient of correlation (*r*) between the actual subsidence and the predicted subsidence. For instance, the maximum values of *RMS* and *MAE* were 10 % lower than the maximum actual subsidence, and the correlation coefficient was more than 0.9 (practically equal to 1).

When the number of monitoring cycles used for training the neural network was 7, the subsidence prediction results were significantly less accurate. This was illustrated by the deviation of the predicted subsidence curve from the actual subsidence curve. At the same time, *RMS* and *MAE* of the predicted subsidence in cycle 8, which provided the most accurate prediction result, were only 14.5 % and 11.3 %, respectively, of the maximum actual subsidence. The values of these parameters in the following cycles were even higher, about 30 % and 20 %, respectively. Thus, when the training data were provided by less than 8 cycles, the subsidence prediction can not ensure acceptable accuracy.

The results of the case study at Mong Duong underground coal mine showed that ANNs were effective in predicting subsidence in underground mining areas. However, in order to improve practicality of ANN subsidence prediction, one should perform extensive studies with a large set of ANN training data, for instance, data on subsidence from many other subsidence troughs, as well as test other neural networks which can prove to be more suitable for this training dataset.

## References

1. Long N. Q., Ahmad A., Cuong C. X., Canh L. Van. Designing observation lines: a case study of the G9 seam in the Mong Duong colliery. *Journal of Mining and Earth Sciences*. 2019;60(3):18–24. URL: [https://www.researchgate.net/publication/333560617\\_Designing\\_observation\\_lines\\_a\\_case\\_study\\_of\\_the\\_G9\\_seam\\_in\\_the\\_Mong\\_Duong\\_colliery](https://www.researchgate.net/publication/333560617_Designing_observation_lines_a_case_study_of_the_G9_seam_in_the_Mong_Duong_colliery)
2. Ambrožič T., Turk G. Prediction of subsidence due to underground mining by artificial neural networks. *Computers and Geosciences*. 2003;29(5):627–637. [https://doi.org/10.1016/S0098-3004\(03\)00044-X](https://doi.org/10.1016/S0098-3004(03)00044-X)
3. King M. A., Watson C. S. Long GPS coordinate time series: Multipath and geometry effects. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2010;115(4):1–23. <https://doi.org/10.1029/2009JB006543>
4. Yang W., Xia X. Prediction of mining subsidence under thin bedrocks and thick unconsolidated layers based on field measurement and artificial neural networks. *Computers and Geosciences*. 2013;52:199–203. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2012.10.017>
5. Cong Khai P., Tran D. T., Nguyen V. H. GNSS/CORS-Based Technology for Real-Time Monitoring of Landslides on Waste Dump – A Case Study at the Deo Nai South Dump, Vietnam. *Inżynieria Mineralna*. 2020;1(2):181–191. <https://doi.org/10.29227/IM-2020-02-23>
6. Hejmanowski R., Witkowski W. T. Suitability assessment of artificial neural network to approximate surface subsidence due to rock mass drainage. *Journal of Sustainable Mining*. 2015;14(2):101–107. <https://doi.org/10.1016/j.jsm.2015.08.014>
7. Zhao K., Chen S. N. Study on artificial neural network method for ground subsidence prediction of metal mine. *Procedia Earth and Planetary Science*. 2011;2(1):177–182. <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2011.09.029>
8. Kim K. D., Lee S., Oh H. J. Prediction of ground subsidence in Samcheok City, Korea using artificial neural networks and GIS. *Environmental Geology*. 2009;58(1):61–70. <https://doi.org/10.1007/s00254-008-1492-9>
9. Kim Y., Son M., Moon H. K., Lee S. A. A study on the development of an artificial neural network model for the prediction of ground subsidence over abandoned mines in Korea. *Geosystem Engineering*. 2017;20(3):163–171. <https://doi.org/10.1080/12269328.2016.1254573>
10. Lee S., Park I., Choi J. K. Spatial prediction of ground subsidence susceptibility using an artificial neural network. *Environmental Management*. 2012;49(2):347–358. <https://doi.org/10.1007/s00267-011-9766-5>
11. Hu Q., Deng X., Feng R., Li C., Wang X., Jiang T. Model for calculating the parameter of the Knothe time function based on angle of full subsidence. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2015;78:19–26. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2015.04.022>
12. Wang C., Ji H. Analysis on the improved time function model of surface subsidence. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*. 2015;19:615–627.
13. Zhanqiang C., Jinzhuang W. Study on time function of surface subsidence the improved Knothe time function. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*. 2003;9.





14. Long N. Q., My V. C., Luyen B. K. Divergency verification of predicted values and monitored deformation indicators in specific condition of Thong Nhat underground coal mine (Vietnam). *Geoinformatica Polonica*. 2016;15:15–22. <https://doi.org/10.4467/21995923GP.16.002.5479>
15. Cui X., Miao X., Wang J., Yang S. et al. Improved prediction of differential subsidence caused by underground mining. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2000;37(4):615–627. [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(99\)00125-2](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(99)00125-2)
16. Gonzalez-Nicieza C., Alvarez-Fernandez M. I., Menendez-Diaz A., Alvarez-Vigil A. E. The influence of time on subsidence in the Central Asturian Coalfield. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2007;66(3):319–329. <https://doi.org/10.1007/s10064-007-0085-2>
17. Liu X., Wang J., Guo J., Yuan H., Li P. Time function of surface subsidence based on Harris model in mined-out area. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2013;23(2):245–248. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2013.04.012>
18. Haykin S. *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*. 2<sup>nd</sup> Edition. 2004.
19. Rumelhart D. E., Hinton G. E., Williams R. J. Learning representations by back-propagating errors. *Nature*. 1986;323:533–536. <https://doi.org/10.1038/323533a0>
20. Long N. Q. A novel approach of determining the parameters of Asadi profiling function for prediction of ground subsidence due to inclined coal seam mining at Quang Ninh coal basin. *Journal of Mining and Earth Sciences*. 2020;61(2):86–95. [https://doi.org/10.46326/JMES.2020.61\(2\).10](https://doi.org/10.46326/JMES.2020.61(2).10)
21. Atiya A. F. *Learning algorithms for neural networks*. California Institute of Technology, Pasadena, California. 1991. URL: [https://thesis.library.caltech.edu/3725/1/Atiya\\_a\\_1991.pdf](https://thesis.library.caltech.edu/3725/1/Atiya_a_1991.pdf)
22. Heaton J. *Introduction to neural networks with Java*. 2<sup>nd</sup> Edition. Heaton Research, Inc. 2008. 439 p.
23. Dayong Y., Jun S. Prediction method for evolutionary neural net of strata subsidence of rock Mass. *Mining Safety & Environmental Protection*. 2002;29(3):11–13. (In Chin.).

### Information about the authors

**Quoc Long Nguyen** – PhD, Department of Mine Surveying, Faculty of Geomatics and Land Administration, Hanoi University of Mining and Geology, Hanoi, Vietnam; ORCID [0000-0002-4792-3684](https://orcid.org/0000-0002-4792-3684), Scopus ID [57204138384](https://scopus.com/authorid/57204138384); e-mail [nguyenquoclong@humg.edu.vn](mailto:nguyenquoclong@humg.edu.vn)

**Quang Minh Nguyen** – Associate Professor of Surveying, Department of Surveying, Faculty of Geomatics and Land Administration, Hanoi University of Mining and Geology, Hanoi, Vietnam; ORCID [0000-0003-2951-8332](https://orcid.org/0000-0003-2951-8332), Scopus ID [57198770131](https://scopus.com/authorid/57198770131); e-mail [nguyenquangminh@humg.edu.vn](mailto:nguyenquangminh@humg.edu.vn)

**Dinh Trong Tran** – PhD, Department of Geodesy and Geomatics Engineering, Faculty of Bridges and Roads, Hanoi University of Civil Engineering, Hanoi, Vietnam; ORCID [0000-0002-3838-9950](https://orcid.org/0000-0002-3838-9950), Scopus ID [57222386870](https://scopus.com/authorid/57222386870); e-mail [trongtd@huce.edu.vn](mailto:trongtd@huce.edu.vn)

**Xuan Nam Bui** – Professor of Mining, Full Professor, Department of Surface Mining, Faculty of Mining, Hanoi University of Mining and Geology, Hanoi, Vietnam; ORCID [0000-0001-5953-4902](https://orcid.org/0000-0001-5953-4902), Scopus ID [36892679300](https://scopus.com/authorid/36892679300); e-mail [buixuannam@humg.edu.vn](mailto:buixuannam@humg.edu.vn)

### Информация об авторах

**Кюок Лонг Нгуен** – доктор наук, кафедра маркшейдерского дела, факультет геоматики и землеустройства, Ханойский университет геологии и горного дела, г. Ханой, Вьетнам; ORCID [0000-0002-4792-3684](https://orcid.org/0000-0002-4792-3684), Scopus ID [57204138384](https://scopus.com/authorid/57204138384); e-mail [nguyenquoclong@humg.edu.vn](mailto:nguyenquoclong@humg.edu.vn)

**Куанг Минь Нгуен** – доцент, кафедра геодезии, факультет геоматики и землеустройства, Ханойский университет геологии и горного дела, г. Ханой, Вьетнам; ORCID [0000-0003-2951-8332](https://orcid.org/0000-0003-2951-8332), Scopus ID [57198770131](https://scopus.com/authorid/57198770131); e-mail [nguyenquangminh@humg.edu.vn](mailto:nguyenquangminh@humg.edu.vn)

**Динь Чонг Тран** – доктор наук, кафедра геодезии и геоматики, факультет мостов и дорог, Ханойский университет гражданского строительства, г. Ханой, Вьетнам; ORCID [0000-0002-3838-9950](https://orcid.org/0000-0002-3838-9950), Scopus ID [57222386870](https://scopus.com/authorid/57222386870); e-mail [trongtd@huce.edu.vn](mailto:trongtd@huce.edu.vn)

**Хуан Нам Буй** – доктор наук, профессор, кафедра открытых горных работ, факультет горного дела, Ханойский университет геологии и горного дела, г. Ханой, Вьетнам; ORCID [0000-0001-5953-4902](https://orcid.org/0000-0001-5953-4902), Scopus ID [36892679300](https://scopus.com/authorid/36892679300); e-mail [buixuannam@humg.edu.vn](mailto:buixuannam@humg.edu.vn)

Received 29.09.2021

Revised 07.10.2021

Accepted 01.12.2021

Поступила в редакцию

Поступила после рецензирования

Принята к публикации

29.09.2021

07.10.2021

01.12.2021



## РАЗРАБОТКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-4-252-258>**Подэтажная система с искусственными целиками из твердеющей закладки для разработки жил в сложных геомеханических условиях**Ш. И. Хакимов, Ш. Р. Уринов   *Навоийский государственный горный институт, г. Навои, Узбекистан* [sh\\_urinov@mail.ru](mailto:sh_urinov@mail.ru)**Аннотация**

При подземной разработке глубоких горизонтов горное давление может проявляться в любой форме, создавая серьезную угрозу жизни работающим, нарушая нормальный ход ведения горных работ и снижая эффективность горного производства. Решение проблемы управления горным давлением становится весьма актуальным для подземных рудников, ведущих разработку жильных месторождений на глубине более 250 м. Целью работы является разработка и обоснование технологических схем, обеспечивающих безопасную и эффективную отработку месторождений в сложных горно-механических условиях. В работе установлены факторы перераспределения и опасной концентрации напряжений в разрабатываемом рудном массиве, изучены способы управления горными массивами в сложных геомеханических условиях, выявлены их достоинства и недостатки. Определено, что подэтажная система разработки с комбинированным использованием существующих способов управления горным давлением и применением самоходной техники в производственных процессах данной системы в настоящее время является одним из прогрессивных для совершенствования и расширения области ее применения. На примере Зармитанской золоторудной зоны рассмотрены варианты технологических схем подэтажной системы, сочетающих комбинацию разных способов управления горным давлением, позволяющих минимизировать недостатки одного, используя преимущества других. Предложены подэтажные системы разработки с искусственными опорными удерживающими целиками многоугольной формы и подэтажные системы разработки с искусственными опорными удерживающими столбчатыми целиками, позволяющие снизить потери руды в междокамерных целиках, потолочинах и при вторичном разубоживании. Кроме этого, искусственные целики, принимая на себя сжимающие/растягивающие напряжения, предотвращают их концентрацию и создают безопасные условия для отработки смежных и нижележащих горизонтов.

**Ключевые слова**

горное давление, геомеханические процессы, система разработки, структурная неоднородность, целик, устойчивость массива, подэтажное обрушение, подэтажные штреки, компенсационные камеры, рудоспуски

**Для цитирования**

Хакимов Ш. И., Уринов Ш. Р. Подэтажная система с искусственными целиками из твердеющей закладки для разработки жил в сложных геомеханических условиях. *Горные науки и технологии*. 2021;6(4):252–258. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-4-252-258>

## MINERAL RESOURCES EXPLOITATION

Research article

**Sublevel stoping with applying artificial hardening stowing pillars for extraction of veins in complicated geotechnical conditions**Sh. I. Khakimov, Sh. R. Urinov   *Navoi State Mining Institute, Navoi, Uzbekistan* [sh\\_urinov@mail.ru](mailto:sh_urinov@mail.ru)**Abstract**

In the process of underground mining of deep levels rock pressure can appear in any form, creating a serious threat to the lives of miners, disrupting the normal course of mining works and reducing the efficiency of mining production. The solution of the problem of rock pressure control becomes very urgent for underground mines developing vein deposits at a depth of more than 250 m. The aim of the study is the development and justification of mining methods to provide safe and efficient mining of deposits in complicated mining and





mechanical conditions. In this paper, the factors of redistribution and dangerous concentration of stresses in the mined ore mass were identified, the methods of rock mass management in complicated geotechnical conditions were studied, and their advantages and disadvantages were revealed. It was determined that the sublevel stoping with the combined use of existing methods of rock pressure control and applying self-propelled mining machinery is currently one of the most promising method finding widening application scope. In the context of Zarmitan gold ore zone the options of technological schemes of the sublevel stoping method were considered, providing for a combination of different methods of rock pressure control, allowing to minimize the disadvantages of one method through using the advantages of other ones. We proposed sublevel stoping options with artificial polygonal pillars and with artificial columnar pillars, which allowed to reduce ore losses in inter-stope pillars, arch pillars, and secondary dilution. In addition, artificial pillars, taking compressive/tensile stresses, prevent their concentration and create safe conditions for extraction at adjacent and underlying levels.

### Keywords

rock pressure, geomechanical processes, mining method, structural heterogeneity, pillar, stability of a rock mass, sublevel caving, sublevel drifts, compensation stopes, ore chutes

### For citation

Khakimov Sh. I., Urinov Sh. R. Sublevel stoping with applying artificial hardening stowing pillars for extraction of veins in complicated geotechnical conditions. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021;6(4):252–258. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-4-252-258>

## Введение

Решение проблемы управления горным давлением является весьма актуальным для целого ряда подземных рудников и во многом сдерживается из-за недостаточной изученности природы и механизма геомеханических процессов и явлений, возникающих с углублением горных работ в тектонически нарушенных массивах горных пород под влиянием многочисленных природных и техногенных факторов [1–3]. Сложная геомеханическая обстановка складывается при отработке жильных месторождений, которые свойственны именно рудным месторождениям [4–6]. Такие факторы, как структурная неоднородность, сложная геометрия формирующихся выработанных пространств, наличие многочисленных и разнообразных целиков, могут приводить к перераспределению и опасной концентрации напряжений в разрабатываемом рудном массиве и в итоге могут являться дополнительными причинами негативных проявлений горного давления [7–9].

В зависимости от степени устойчивости вмещающих пород и конструктивных особенностей применяемых систем разработки поддержание очистного пространства производят разными способами, имеющими свои достоинства и недостатки, в том числе различные технико-экономические показатели.

## Материалы и методы

Анализ технической литературы и практика работы известных крупных горнорудных компаний показывают неоспоримые и очевидные преимущества систем поэтажного обрушения [10–12, 13, 14] как более экономичного и прогрессивного способа разработки. В данной системе разработки проходка подготовительно-нарезных выработок (подэтажные штреки, компенсационные камеры, рудоспуски и др.) приводит к разгрузке массива с перераспределением концентраций напряжений внутри и за пределами выемочной единицы. Создаются безопасные условия для отработки смежных рудных тел и нижележащих горизонтов.

Необходимо отметить, что применение самоходной техники в производственных процессах подземной добычи системой с поэтажным обрушением жильных месторождений открывает новые возможности для совершенствования систем разработки, требует полного изменения существующих технологических схем подготовки (рабочих горизонтов, выемочных единиц и шахты в целом) и выбора их параметров.

Анализ подземных горных работ рудников Зармитанской золоторудной зоны предопределяет решение в пользу поэтажной отбойки руды скважинами малого диаметра, включающей прогрессивную технологию и механизацию работ с самоходной техникой [15].

Новые ресурсосберегающие технологии с поэтажным обрушением, сочетающие комбинацию разных способов управления горным давлением, позволяющих минимизировать недостатки известных технологий, являются одними из прогрессивных, но малоизученных, область их безопасного и эффективного применения не определена и требует дополнительных исследований.

На основе вышеизложенного для отработки запасов Зармитанской золоторудной зоны рассмотрены и предлагаются два варианта технологических схем поэтажным обрушением с комбинированным способом управления горным массивом (рис. 1 и 2).

Отличительной особенностью первого варианта технологической схемы (см. рис. 1) является комбинированное использование способов поддержания выработанных пространств искусственными целиками многоугольной формы, формируемыми путем закладки твердеющего материала в специально подготовленные гнезда (выработки).

Здесь возможны два варианта схем подготовки – блочная и участковая. Блочную схему целесообразно использовать при отработке коротких по протяженности рудных тел. Выемку запасов при значительной протяженности рудного тела целесообразно осуществлять по участковой схеме.

В блочных схемах проводят две фланговые восстающие. Одна из них – рудная – используется в качестве компенсационной камеры, а другая – полевая – в качестве рудоспуска из подэтажей.

В участковых схемах подготовки проходят две восстающие на флангах и одну полевую – в центре блока. При этом фланговые восстающие используются как компенсационные камеры и для отвода отработанной струи воздуха, а центральная восстающая – в качестве рудоспуска из подэтажей обоих флангов – левых и правых.

В участковых схемах предусматривается также проводить сбойки, соединяющие смежные подэтажи между собой, которые необходимы для отвода загрязненного воздуха и выпуска попутной руды из подэтажей. Эти сбойки в дальнейшем – при формировании искусственного целика – будут камерами для заливки твердеющего закладочного материала. Размеры и расстояния между сбойками определяются по нормативному пределу прочности закладочного материала, определяемому в зависимости от горно-геологических и горнотехнических условий.

Подготовительно-нарезные работы в обоих вариантах включают проходку восстающих, наклонного участкового транспортного съезда (НТС), ортов заездов к НТС и рудоспуску, заездов на участковый НТС и к рудоспуску в концентрационном горизонте. В качестве нарезных проводятся также подэтажные штреки. Высота подэтажей 10–15 м, в зависимости от мощности рудных тел и возможности искривления скважин.

Очистные работы при варианте разработки искусственными целиками многоугольной формы проводятся с отставанием от верхнего подэтажа на 10–12 м.

Работы по возведению искусственных целиков осуществляются одновременно на всех подэтажах в следующем порядке:

1. Производится расширение и образование купола потолочины над подэтажным штреком до требуемого размера путем разбуривания, заряжания и взрывания комплекта шпуров по форме клина. При этом краевые шпуров бурятся под углом не менее 45°.

2. Потолочина над расширенной частью подэтажа с выемкой образуется путем проходки наклонных выработок обычным способом толщиной 2,0 м.

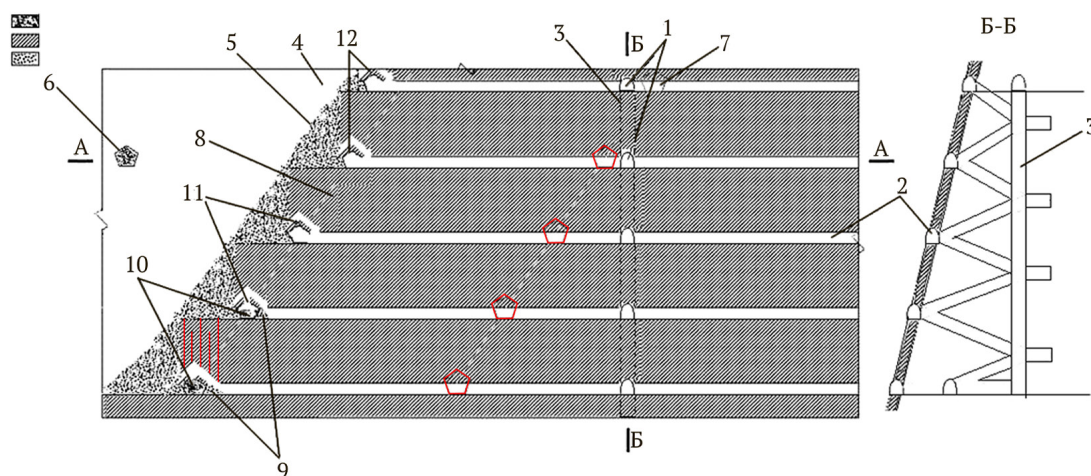
3. У верхушки потолочины для заливки твердеющего материала и создания искусственного целика путем разбуривания, заряжания и взрывания комплекта параллельных шпуров образуется щель.

4. Проводится зачистка основания части подэтажа от посторонних предметов под искусственный целик, осыпанная руда служит стенкой для искусственного целика с забойной стороны.

5. Для образования противоположной стенки для создания искусственного целика производится отсыпка руды с последующим выпуском руды при отработке нижнего подэтажа.

6. Заполнение созданной выработки производится твердеющей закладкой с добавлением в ее состав крупных породных заполнителей.

Основными достоинствами этой системы являются обеспечение надежной безопасности, более прочного материала целика [2, 4], простая организация очистных работ и меньшие материальные затраты по сравнению с системой разработки с закладкой очистного пространства, сравнительно высокие каче-



**Рис. 1.** Подэтажная система разработки с искусственными целиками многоугольной формы из твердеющей закладки:

- 1 – заезд к рудоспуску; 2 – подэтажный штрек; 3 – рудоспуск; 4 – открытое выработанное пространство; 5 – отбитая руда; 6 – искусственный целик многоугольной формы; 7 – место заложения очередного целика многоугольной формы; 8 – неотбитая руда; 9 – перегородка из рудной насыпи; 10 – положение выработки (сосуды) для устройства целика на этапе ее строительства; 11 – положение выработки (сосуды) на этапе формирования целика; 12 – положение выработки с перекрытием (рудным насыпом) перед закладкой целика; 13 – обуренные скважины

**Fig. 1.** Sublevel stoping with artificial consolidating stowing pillars of polygonal shape:

- 1 – crosscut to ore chute; 2 – sublevel drift; 3 – ore chute; 4 – open mined-out space; 5 – muck; 6 – artificial polygonal pillar; 7 – place of establishing the next pillar of polygon shape; 8 – intact ore; 9 – ore embankment partition; 10 – position of drift at the stage of its construction for pillar establishing; 11 – position of drift at the stage of pillar establishing; 12 – position of drift with overlapping (ore embankment) before pillar establishing; 13 – boreholes

ственные и количественные показатели добычи руды, широкие возможности применения самоходных машин в производственных процессах и операциях очистных работ.

Основные недостатки этой системы разработки: жесткая связь процессов отбойки руды с операциями сооружения целиков при подходе к линии их формирования, низкий уровень механизации при создании целиков, значительные затраты труда и времени на возведении целиков.

При втором варианте подэтажной системы разработки с искусственными столбчатыми целиками очистные работы и формирование целиков (рис. 2) осуществляются в следующем порядке:

1. Пройденные ранее сбойки, начиная с верхнего подэтажа по направлению от флангов к центральной части участка по очереди заполняются твердеющей закладкой. Такой порядок заполнения можно осуществлять одновременно на последующих нижележащих подэтажах. Здесь необходимо отметить, что процесс по созданию искусственного целика в рассматриваемой схеме не имеет жестких связей с другими процессами нарезных и очистных работ. Поэтому закладочные работы можно, даже нужно, проводить одновременно с проходкой подэтажных штреков с оставанием на одну сбойку, поскольку эффективность твердеющей закладки зависит от времени затвердения до монолитного бетона.

2. Очистные работы начинают из верхнего подэтажа одновременно в двух флангах по направлению к центру участка. Опережение очистных работ в верхнем подэтаже от нижних и последующих подэтажей должно быть не менее 10–12 м.

Отбойку руды осуществляют с помощью комплекта веерных скважин. Скважины бурят самоходными буровыми машинами. При взрывании часть отбитой руды остается в подошве подэтажных штреков, а другая часть падает по выработанному пространству вниз.

Основными достоинствами этой системы являются обеспечение безопасности, простая организация очистных работ и возведения искусственных целиков, низкий уровень трудовых и материальных затрат, по сравнению с системами разработки с закладкой очистного пространства, сравнительно высокие качественные и количественные показатели добычи руды, возможность гибкого перехода от одной схемы к другой. Отличительной чертой данной схемы по сравнению с первым вариантом является практическая независимость процесса закладки от процессов нарезных и очистных работ. Это позволяет вести закладочные работы одновременно с проходкой подэтажных штреков, продлевая при этом время затвердевания закладочного материала и повышая прочность целика.

Основные недостатки этой системы: высокий расход твердеющего материала и значительные затраты времени и труда на возведение целиков.

В обоих рассматриваемых вариантах доставку отбитой руды из каждого подэтажа до рудоспуска предполагается осуществлять автономно, что исключает необходимость создания откаточного горизонта.

Все операции по возведению искусственных целиков в изложенных технологических схемах выполняются преимущественно с помощью самоходной техники, имеющейся на рудниках Зармитанской золоторудной зоны.

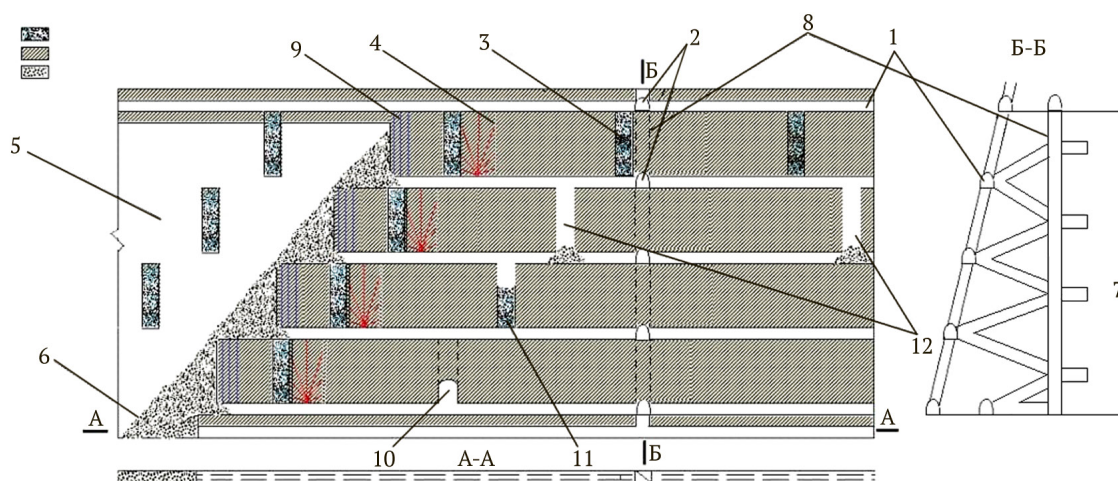


Рис. 2. Подэтажная система разработки с искусственными столбчатыми целиками:

1 – подэтажный штрек; 2 – заезд к рудоспуску; 3 – столбчатый искусственный целик; 4 – обуренные скважины для образования компенсационной камеры; 5 – выработанное открытое пространство; 6 – отбитая руда; 7 – неотбитая руда, 8 – рудоспуск; 9 – перегородка из рудной насыпи; 10 – положения выработки для устройства столбчатого целика на этапе ее формирования; 11 – положения выработки на этапе формирования столбчатого целика; 12 – положения выработки с перекрытием (рудным насыпом) перед закладкой столбчатого целика

Fig. 2. Sublevel stoping with artificial columnar pillars:

1 – sublevel drift; 2 – crosscut to ore chute; 3 – artificial columnar pillar; 4 – boreholes for compensation stope formation; 5 – open mined-out space; 6 – muck; 7 – intact ore; 8 – ore chute; 9 – ore embankment partition; 10 – position of drift at the stage of its construction for pillar establishing; 11 – position of drift at the stage of pillar establishing; 12 – position of drift with overlapping (ore embankment) before pillar establishing





### Заключение

Таким образом, на примере Зармитанской золоторудной зоны для безопасной и полной отработки запасов руды в слабоустойчивых массивах и зонах концентрации напряжений предлагаются варианты подэтажной системы разработки с искусственными опорными удерживающими целиками из твердеющей закладки многоугольной и столбчатой формы.

Безопасные условия и полнота отработки в предлагаемых вариантах достигаются путем использования комплекса подготовительно-нарезных выработок подэтажной системы разработки в качестве отрезных щелей для снятия и перераспределения напряжения в массиве горных пород и с магази-

рованием отбитой руды в комбинации с искусственными опорными удерживающими целиками из твердеющей закладки.

Искусственные опорные удерживающие целики из твердеющей закладки обеспечивают поддержание вмещающих пород камеры в устойчивом состоянии, позволяющем сократить отслоение боковых пород и вторичное разубоживание, снизить давление вмещающих пород на замагазинированную руду и улучшить условия выпуска. Целики принимают на себя сжимающие/растягивающие напряжения, предотвращают их концентрации и создают безопасные условия отработки смежных и нижележащих горизонтов.

### Список литературы

1. Авдеев А. Н., Сосновская Е. Л. Исследование напряженно-деформированного состояния конструктивных элементов систем разработки сближенных крутопадающих жил. *Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле РАН.* 2015;(1):67–75. URL: <http://journals.istu.edu/nzn/journals/2015/01/articles/07>
2. Potvin Y., Wesseloo J. Towards an understanding of dynamic demand on ground support. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy.* 2013;113(12):913–922. URL: <https://www.saimm.co.za/Journal/v113n12p913.pdf>
3. Abin Thomas C. A., Jayalakshmi S., Jerin K. A., Kumar K. S., Sreepriya K. V. Development of self compacting concrete mix and analysis of compressive strength by replacement of fines with iron ore fines. *International Journal of Civil Engineering and Technology.* 2017;8(4):1928–1937. URL: [https://iaeme.com/Home/article\\_id/IJCIET\\_08\\_04\\_219](https://iaeme.com/Home/article_id/IJCIET_08_04_219)
4. Дорджиев Д. Ю. *Обеспечение устойчивости выработок в рудном массиве при разработке удароопасных урановых месторождений (на примере месторождения «Антей»).* [Автореф. дис.... канд. техн. наук]. Санкт-Петербург; 2011.
5. Криницын Р. В., Полховский В. И., Худяков С. В. Повышение устойчивости кровли камер при отработке месторождений подземным способом. *Проблемы недропользования.* 2018;(1):22–28. <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2018.01.022>
6. Барановский К. В., Рожков А. А. Обоснование технологии с самоходным оборудованием при отработке нижних горизонтов Урупского медноколчеданного месторождения. *Проблемы недропользования.* 2015;(3):36–43. URL: <https://trud.igdur.ru/edition/6/5>
7. Veenstra R. L. A methodology for predicting dilution of cemented paste backfill'. In: Potvin Y. (ed.). *Proceedings of the International Seminar on Design Methods in Underground Mining.* Perth: Australian Centre for Geomechanics; 2015. Pp. 527–539. [https://doi.org/10.36487/ACG\\_rep/1511\\_33\\_Veenstra](https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1511_33_Veenstra)
8. Ping Wang, Huiqiang Lia, Yan Lib. Bo Cheng Stability analysis of backfilling in subsiding area and optimization of the stopping sequence. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering.* 2013;5(6):478–485. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2013.07.008>
9. Потапчук М. И. *Геомеханическое обоснование мер безопасности при разработке жильных месторождений восточного Приморья.* [Автореф. дис.... канд. техн. наук]. Хабаровск; 2012.
10. Лобанов В. С., Рахимджанов А. А., Киселенко А. С., Казаков Б. И., Вахитов Р. Р. Технология и направления совершенствования отработки месторождения «Чармитан» с применением самоходного оборудования на руднике Зармитан. *Горный вестник Узбекистана.* 2009;(4):38–40. URL: <http://gorniyvestnik.uz/assets/uploads/pdf/2009-oktyabr-dekabr.pdf>
11. Sozonov K. V. Stableness improvement of the excavations during the chamber-and-pillar development of Yakovlevsky Deposit reserves. In: Litvinenko V. (ed.) *Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses: Proceedings of the 2018 European Rock Mechanics Symposium.* London: CRC Press; 2018. Pp. 1653–1657.
12. Chilala G. C., de Assuncao J., Harris R., Stephenson R.M. Initial effects of improved drill and blast practices on stope stability at Acacia's Bulyanhulu Mine. In: Potvin Y. (ed.). *Proceedings of the International Seminar on Design Methods in Underground Mining.* Perth: Australian Centre for Geomechanics; 2015. Pp. 241–254. [https://doi.org/10.36487/ACG\\_rep/1511\\_12\\_Chilala](https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1511_12_Chilala)
13. Заиров Ш. Ш., Махмудов Д. Р., Уринов Ш. Р. Теоретические и экспериментальные исследования взрывного разрушения горных пород при различных формах зажатой среды. *Горный журнал.* 2018;(9):46–50. <https://doi.org/10.17580/gzh.2018.09.05>



14. Заиров Ш. Ш., Уринов Ш. Р., Номдоров Р. У. Формирование устойчивости бортов при ведении взрывных работ на карьерах Кызылкумского региона. *Горные науки и технологии*. 2020;5(3):235–252. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2020-3-235-252>

15. Хакимов Ш. И., Тажиев У. Р., Насриддинов А. Ш. Анализ подземной разработки крутопадающих многожилных рудных тел отделяющимися породными. *Горный вестник Узбекистана*. 2015;(3):17–19. URL: <http://gorniyvestnik.uz/assets/uploads/pdf/2015-iyul-sentyabr.pdf>

## References

1. Avdeev A. N., Sosnovskaya E. L. Study of stress-strain state of roof, chambers and pillars of superimposed steeply dipping veins. *Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences*. URL: <http://journals.istu.edu/nzn/journals/2015/01/articles/07>

2. Potvin Y., Wesseloo J. Towards an understanding of dynamic demand on ground support. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2013;113(12):913–922. URL: <https://www.saimm.co.za/Journal/v113n12p913.pdf>

3. Abin Thomas C. A., Jayalakshmi S., Jerin K. A., Kumar K. S., Sreepriya K. V. Development of self compacting concrete mix and analysis of compressive strength by replacement of fines with iron ore fines. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2017;8(4):1928–1937. URL: [https://iaeme.com/Home/article\\_id/IJCIET\\_08\\_04\\_219](https://iaeme.com/Home/article_id/IJCIET_08_04_219)

4. Dorjiev D. Yu. *Ensuring the stability of workings in an ore mass when developing rock-bump hazardous uranium deposits (by the example of the Antey deposit)*. [Extended abstract of Cand. Sci. (Eng.) Dissertation.] St. Petersburg; 2011. (In Russ.)

5. Krinitsyn R. V., Polkhovskiy V. I., Hudyakov S. V. Stabilization of chamber roofing by underground method of deposit developing. *Problemy nedropol'zovania*. 2018;(1):22–28. (In Russ.). <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2018.01.022>

6. Baranovskiy K. V., Rozhkov A. A. Grounding the technology with mobile equipment mining Theurupsky Chalcopyrite Deposit lower horizons. *Problemy nedropol'zovania*. 2015;(3):36–43. (In Russ.). URL: <https://trud.igduran.ru/edition/6/5>

7. Veenstra R. L. A methodology for predicting dilution of cemented paste backfill. In: Potvin Y. (ed.). *Proceedings of the International Seminar on Design Methods in Underground Mining*. Perth: Australian Centre for Geomechanics; 2015. Pp. 527–539. [https://doi.org/10.36487/ACG\\_rep/1511\\_33\\_Veenstra](https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1511_33_Veenstra)

8. Ping Wang, Huiqiang Lia, Yan Lib. Bo Cheng Stability analysis of backfilling in subsiding area and optimization of the stoping sequence. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2013;5(6):478–485. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2013.07.008>

9. Potapchuk M. I. *Geomechanical substantiation of safety measures in the development of vein deposits of eastern Primorye*. [Extended abstract of Cand. Sci. (Eng.) Dissertation.] Khabarovsk; 2012. Khabarovsk; 2012. (In Russ.)

10. Lobanov V. S., Rakhimdzhonov A. A., Kiselchenko A. S., Kazakov B. I., Vakhitov R. R. Technology and directions of improvement of Zarmitan deposit development using self-propelled equipment at Zarmitan mine. *Mining Bulletin of Uzbekistan*. 2009;(4):38–40. (In Russ.). URL: <http://gorniyvestnik.uz/assets/uploads/pdf/2009-oktyabr-dekabr.pdf>

11. Sozonov K. V. Stableness improvement of the excavations during the chamber-and-pillar development of Yakovlevsky Deposit reserves. In: Litvinenko V. (ed.) *Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses: Proceedings of the 2018 European Rock Mechanics Symposium*. London: CRC Press; 2018. Pp. 1653–1657.

12. Chilala G. C., de Assuncao J., Harris R., Stephenson R.M. Initial effects of improved drill and blast practices on stope stability at Acacia's Bulyanhulu Mine. In: Potvin Y. (ed.). *Proceedings of the International Seminar on Design Methods in Underground Mining*. Perth: Australian Centre for Geomechanics; 2015. Pp. 241–254. [https://doi.org/10.36487/ACG\\_rep/1511\\_12\\_Chilala](https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1511_12_Chilala)

13. Zairov Sh. Sh., Makhmudov D. R., Urinov Sh. R. Theoretical and experimental research of explosive rupture of rocks with muck piles of different geometry. *Gornyi Zhurnal*. (In Russ.). 2018;(9):46–50. <https://doi.org/10.17580/gzh.2018.09.05>

14. Zairov S. S., Urinov S. R., Nomdorov R. U. Ensuring wall stability in the course of blasting at open pits of Kyzyl Kum Region. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2020;5(3):235–252. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2020-3-235-252>

15. Khakimov Sh. I., Tazhiev U. R., Nasridinov A. Sh. Analysis of underground development of steeply-dipping multi-vein ore bodies separated by rocks. *Mining Bulletin of Uzbekistan*. 2015;(3):17–19. (In Russ.). URL: <http://gorniyvestnik.uz/assets/uploads/pdf/2015-iyul-sentyabr.pdf>



### Информация об авторах

**Шодибой Ихматуллаевич Хахимов** – к.т.н., доцент кафедры «Горное дело», Навоийский государственный горный институт, г. Навои, Узбекистан; e-mail [sh.xakimov2021@gmail.com](mailto:sh.xakimov2021@gmail.com)

**Шерали Рауфович Уринов** – д.т.н., профессор, профессор кафедры «Автоматизации и управления», Навоийский государственный горный институт, г. Навои, Узбекистан; ORCID [0000-0002-2910-9806](https://orcid.org/0000-0002-2910-9806), Scopus ID [57224523135](https://scopus.com/authorid/57224523135); e-mail [sh\\_urinov@mail.ru](mailto:sh_urinov@mail.ru)

### Information about the authors

**Shodiboy I. Khakimov** – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Mining Department, Navoi State Mining Institute, Navoi, Uzbekistan; e-mail [sh.xakimov2021@gmail.com](mailto:sh.xakimov2021@gmail.com)

**Sherali R. Urinov** – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Mining Department, Navoi State Mining Institute, Navoi, Uzbekistan; ORCID [0000-0002-2910-9806](https://orcid.org/0000-0002-2910-9806), Scopus ID [57224523135](https://scopus.com/authorid/57224523135); e-mail [sh\\_urinov@mail.ru](mailto:sh_urinov@mail.ru)

Поступила в редакцию	21.10.2021	Received	21.10.2021
Поступила после рецензирования	25.11.2021	Revised	25.11.2021
Принята к публикации	01.12.2021	Accepted	01.12.2021





## СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД. ГЕОМЕХАНИКА И ГЕОФИЗИКА

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-4-259-266>

## Гранулометрический состав отвальных массивов разрезов Кузбасса

С. О. Марков<sup>1,2</sup>  , Е. В. Мурко<sup>1,3</sup>  , Ф. С. Непша<sup>1</sup>  <sup>1</sup> Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева (КузГТУ), г. Кемерово, Российская Федерация<sup>2</sup> Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева (филиал в г. Междуреченске), г. Междуреченск, Российская Федерация<sup>3</sup> Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева» (филиал в г. Прокопьевске), г. Прокопьевск, Российская Федерация✉ [markovso@kuzstu.ru](mailto:markovso@kuzstu.ru)

## Аннотация

Гранулометрический состав как структурная характеристика отвальных и насыпных массивов при ведении горных и строительных работ приобретает количественные значения в процессе взрывной подготовки горных пород, погрузочных операций и транспортирования горной массы. Такие физико-механические и структурно-текстурные параметры скального массива горных пород, как предел прочности пород и массива, трещиноватость, диаметр естественной отдельности горных пород, оказывают значительное влияние на гранулометрический состав взорванной горной массы. С другой стороны, такие характеристики, как устойчивость, проницаемость отвальных массивов, во многом зависят от литологического и гранулометрического состава разрыхленных горных пород, слагающих отвалы, и их распределения по высоте. В статье описаны результаты исследования гранулометрического состава горных пород отвалов разрезов Кузбасса и особенности его пространственного изменения в теле отвалов. Изучение текстур насыпных массивов и физико-технических свойств укладываемых пород проводилось как на отвалах Кузбасса, так и в лабораторных условиях. Гранулометрический состав мелкокусковой части отвалов с размерами кусков пород до 50 мм исследовался ситовым методом по ГОСТ 12536–2014, а средне- и крупнокусковой – методом косоугольной фотопланиметрии. Полевые наблюдения показали, что нижняя часть отсыпанных по бульдозерной периферийной или экскаваторной технологии отвальных массивов сформирована крупной фракцией со средним размером кусков  $d_{cp} = 0,8–1$  м, средняя часть – кусками породы размером  $d_{cp} = 0,4–0,6$  м, верхняя – преимущественно мелкой фракцией с размером кусков менее 0,1 м. Соотношение длины, ширины и толщины у кусков взорванных горных пород составляет 1:0,85:0,8, что соответствует удлиненно-уплощенной форме частиц. Это требует значительного числа координат при описании положения кусков в массиве, а также учета моментов инерции при моделировании движения таких частиц до достижения ими устойчивого положения. Для учета неизометричной формы частиц при моделировании может быть использовано современное некоммерческое и коммерческое программное обеспечение при наличии необходимых аппаратных мощностей.

## Ключевые слова

горные породы, отвал, сыпучая среда, гранулометрический состав, трещиноватость, геомеханические расчеты, Кузбасс

## Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№075-03-2021-138/3).

## Для цитирования

Марков С. О., Мурко Е. В., Непша Ф. С. Гранулометрический состав отвальных массивов разрезов Кузбасса. *Горные науки и технологии*. 2021;6(4):259–266. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-4-259-266>

## MINING ROCK PROPERTIES. ROCK MECHANICS AND GEOPHYSICS

Research article

## Grain size distribution of waste rock masses of Kuzbass coal strip mines

S. O. Markov<sup>1,2</sup>  , E. V. Murko<sup>1,3</sup>  , F. S. Nepsha<sup>1</sup>  <sup>1</sup> T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russian Federation<sup>2</sup> T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (branch in Mezhdurechensk), Mezhdurechensk, Russian Federation<sup>3</sup> T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (branch in Prokopyevsk), Prokopyevsk, Russian Federation✉ [markovso@kuzstu.ru](mailto:markovso@kuzstu.ru)

## Abstract

Grain size distribution as a structural characteristic of waste rock and bulk masses in the course of mining and construction works acquires quantitative values in the process of rock blasting and hauling of rock mass. Such physical-mechanical and structural-textural parameters of a rock mass, as the ultimate strength



of rocks and rock mass, fracturing, diameter of the natural rock jointing, have a significant impact on the blasted rock mass grain size distribution. On the other hand, such characteristics as stability, permeability of waste rock masses largely depend on the lithology and grain size distribution of the loosened rocks composing waste rock dumps and their height distribution within a dump. The paper describes the findings of the study of the grain size distribution of waste rock masses of Kuzbass coal strip mines and the features of its spatial variations within the masses. The textures of the bulk masses and physical and technical properties of the stacked rocks were studied both at the Kuzbass waste rock sites and in laboratory conditions. The grain size distribution of the fine lump part of the dumps with the lump size up to 50 mm was investigated by sieve method according to GOST 12536–2014, and the medium and large lump part was studied using oblique photoplanimetry. The field observations showed that the bottom part of the rock dumps, dumped by peripheral bulldozer or excavator methods was composed of coarse fraction with average lump size of:  $d_{cr} = 0.8–1$  m, while the middle part, of rock lumps of  $d_{cr} = 0.4–0.6$  m, and the upper part, mainly of fine fraction with lump size of less than 0.1 m. The ratio of length, width, and thickness of the blasted rock lumps was 1:0.85:0.8, which corresponds to elongated-flattened shape of the lumps. This requires significant number of coordinates for describing the lump positions in the rock mass, as well as taking into account the moments of inertia when modeling the motion of such lumps until they reach a stable position. Up-to-date non-commercial or commercial software and corresponding hardware can be used to take into account non-isometric shape of the lumps when modeling their motion.

### Keywords

rocks, waste dump, loose medium, grain size distribution, fracturing, geotechnical calculations, Kuzbass

### Acknowledges

The research was supported by the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (No. 075-03-2021-138/3).

### For citation

Markov S. O., Murko E. V., Nepsha F. S. Grain size distribution of waste rock masses of Kuzbass coal strip mines. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021;6(4):259–266. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-4-259-266>

## Введение

Мониторинг гранулометрического состава отвалов вскрышных пород на действующих разрезах имеет важное значение, поскольку именно он во многом определяет несущую способность отвальных массивов. Это влияние выражается в неравномерном распределении кусков горных пород с различными размерами по высоте. Вместе с тем размеры кусков взорванных пород имеют прямую корреляцию с прочностью пород в массиве [1]. Данные гранулометрического состава взорванных вскрышных пород применяются при математическом моделировании отвалов для геомеханических расчетов их устойчивости.

Актуальность работы также обусловлена тем, что в настоящее время уделяется очень мало внимания исследованиям, направленным на изучение параметров забойных блоков гидравлических экскаваторов. В связи с тем что фирмы-производители предоставляют данные, описывающие параметры черпания экскаваторов, только по усредненным графикам, невозможно сделать вывод об устойчивости экскаватора, расположенного на верхней площадке уступа, при его работе нижним черпанием [2–4]. Угол откоса уступа в этом случае должен рассчитываться индивидуально для каждого из вариантов горно-геологических условий, которых может быть множество из-за разнообразия литотипов разрабатываемых горных пород. Кроме того, надо учитывать связность пород, их кусковатость и другие физико-технические свойства.

Помимо решения задач устойчивости массива взорванной горной массы, определенный интерес вызывает оценка использования разрушенных горных пород в качестве наполнителя для очистных со-

оружений шахтных и карьерных сточных вод. Влияние гранулометрического и петрографического состава горной массы на фильтровальные характеристики искусственных фильтрующих массивов показано в работах [5, 6]. Изучение гранулометрического состава взорванных пород позволит определить первоочередные подходы к решению вышеуказанных задач.

## Материалы и методы

Изучение гранулометрического состава отвального массива имеет своим объектом отдельные куски породы с различными формой и размерами, а предметом – размеры кусков, по которым производится разделение на фракции взорванной горной массы [7]. В гранулометрии геоматериалов форма кусков породы имеет не меньшее значение, чем их размер, поскольку выступает своего рода «определителем» размера.

Интегрально размер и форма куска породы могут быть выражены через среднюю длину секущих, т.е. среднее расстояние между случайными парами точек, принадлежащих поверхности куска:

$$l_{average} = 4 \frac{V}{S}, \quad (1)$$

где  $V$ ,  $S$  – объем и площадь поверхности куска породы соответственно.

Из-за неизометричности кусков породы их средний линейный размер можно принять за  $1,5l_{average}$ . Для изометричных тел средний линейный размер совпадает с их истинными размерами (для шара – это диаметр, для куба – ребро). В качестве среднего размера кусков на практике зачастую принимают

среднее геометрическое или среднее арифметическое максимального и минимального значений линейного размера.

В гранулометрии разрушенных горных пород часто используется понятие эквивалентного диаметра. И для куска породы из развала взорванной горной массы, и для шара, имеющего тот же объем, что и рассматриваемый кусок породы, объем определяется как

$$V = \frac{1}{6} \pi l_{average}^3, \quad (2)$$

где  $l_{average}$  – средний размер куска или его эквивалентный диаметр ( $d_{eq}$ ).

В плоском случае эквивалентный диаметр куска породы будет равен диаметру круга, площадь которого равна средней площади сечений куска случайными плоскостями.

Вмещающие породы Кузбасса представлены в основном аргиллитами, алевролитами и песчаниками. В значительно меньшей степени встречаются магматические плутонические и метаморфические породы. Замеры длины  $A$ , ширины  $B$  и толщины  $C$  кусков различных размеров для осадочных пород показали соотношение  $A : B : C = 1 : 0,85 : 0,8$  (усредненные значения). Полученное соотношение практически совпадает с аналогичным соотношением для кусков взорванных аргиллитов, алевролитов и песчаников разрезов Кузбасса  $A : B : C = 1 : 0,8 : 0,75$ , описанного в работах [8, 9].

В процессе выемки, погрузки, транспортировки и отвалообразования горной массы острые и выступающие ребра кусков породы откальваются, что приближает форму частиц породы к удлиненно-уплощенной.

Для моделирования отвальных (в общем случае – любых насыпных) массивов с применением современного свободно распространяемого (YADE, MercuryDPM и аналогичных) и коммерческого программного обеспечения (PLAXIS, PFC2D, Altair EDEM) формой модельного представления частиц может служить как сфера, так и любая другая объемная фигура с топологически замкнутой поверхностью. Если в начале 2000-х годов последнее было практически невозможно из-за аппаратных ограничений [10, 11], то в настоящее время технически это реализуемо в рамках отдельной лаборатории. Тем не менее моделирование кусков горных пород телами неизометричной формы целесообразно лишь с применением серьезных вычислительных мощностей на современных графических процессорах с распределенной средой моделирования, с применением архитектуры CUDA и PhysX и значительными объемами как графической, так и оперативной памяти, при использовании локальных рабочих станций.

За размер куска породы при моделировании структуры насыпного массива принимается эквивалентный диаметр, вычисленный по данным гранулометрического состава пород, укладываемых в такой массив.

Теоретические основы математического моделирования зернистых сред, заложенные отечествен-

ными [10–14] и зарубежными авторами [15–18], показывают, что наиболее приемлемой модельной формой частицы зернистой среды является либо одна сфера, либо объемная фигура, представленная сближенными (межцентровое расстояние от 0,2 радиуса) сферами – в объемном или кругами – в плоском случае. Это подтверждается тем, что указанные формы частиц являются наиболее приемлемыми для моделирования сыпучих сред с применением, в частности, свободно распространяемых программных кодов Yade и MercuryDPM, без существенной потери скорости моделирования, в отличие от более сложной формы кусков, состоящих, например, из трех и более сопряженных сфер. Использование сложных форм кусков моделируемой среды приводит к увеличению времени моделирования аналогичного объема среды на один-два порядка даже с применением современных конфигураций персональных компьютеров (твёрдотельный накопитель формата M.2 с поддержкой NVMe, центральный процессор 4,2 ГГц, оперативная многоканальная память 64 Гб, графический процессор 1,7 ГГц, графическая видеопамять 4 Гб, поддержка CUDA и PhysX).

Изучение текстур насыпных массивов и физико-технических свойств укладываемых пород проводилось как на отвалах Кузбасса, так и в лабораторных условиях [19, 21, 22]. Гранулометрический состав мелкокусовой части отвалов с размерами кусков пород до 50 мм исследовался ситовым методом по ГОСТ 12536–2014, а средне- и крупнокусовой – методом косоугольной фотопланиметрии. При этом при обработке фотографий откосов применялась демо-версия программного обеспечения «Split-Desktop».

## Результаты

Результаты исследований гранулометрического состава представлены на рис. 1 и 2. На рис. 2 представлено процентное содержание всех частиц массива (соответствующее кривой 4 на рис. 1).

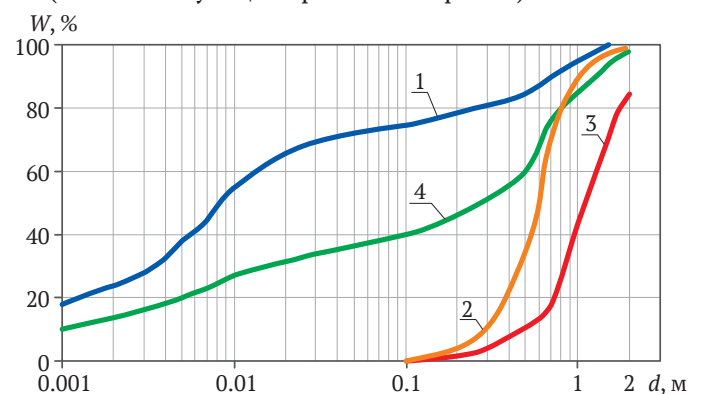


Рис. 1. Интегральные (суммарные) кривые гранулометрического состава отвалов  $W_{I(d)}$  по объемному содержанию фракций:

1, 2, 3 – для нижней, средней, верхней частей отвала соответственно; 4 – для всего отвала

Fig. 1. Integral (cumulative) curves of the waste dumps grain size distribution  $W_{I(d)}$  by the volumetric content of fractions: 1, 2, 3 – for the lower, middle, upper parts of the waste dump, respectively; 4 – for the whole waste dump



Из рис. 1 видно, что нижняя треть отвалов содержит преимущественно куски крупных размеров ( $d_{eq} \approx 0,8$  м), средняя часть – средних размеров ( $d_{eq} \approx 0,4$  м), верхняя часть – мелких размеров ( $d_{eq} \approx 0,04$  м). Сегрегация размеров кусков по высоте отвала обусловлена прямой пропорциональностью расстояния перемещения куска по откосу его размеру.

Высокая однородность гранулометрического состава характерна для нижних слоёв отвала (для крупнукусковой массы коэффициент неоднородности  $C_u = 2,4$ , для среднекусковой –  $C_u = 2,2$ ). Значение пористости в нижних слоях достигает значения  $n = 40$  %, а абсолютные размеры пустот – нескольких десятков сантиметров. Нижние слои отвалов характеризуются в целом каркасной или каркасно-незаполненной внутренней текстурой.

Более сложная мелкокусковая система характерна для верхнего слоя отвалов. Текстура этого слоя отличается относительно выдержанной изотропностью из-за резкой разноразмерности частиц ( $C_u > 20$ ) и хаотического чередования пространственных решеток различной конфигурации, вплоть до их полного отсутствия. По сравнению с нижней и средней третями отвального массива (по высоте) абсолютные размеры пор верхнего слоя на 1–3 порядка меньше.

Резкое уменьшение пористости и размеров пор обусловлено более интенсивным физическим выветриванием, разрушением кусков и их переупаковкой в верхнем слое с течением времени, по сравнению с нижними слоями. Интенсивность протекания процессов выветривания зависит от водоустойчивости и прочности пород.

Скальные и полускальные вскрышные породы угленасыщенных толщ Кузбасса представлены главным образом аргиллитами, алевролитами и песчаниками различной прочности. Предел прочности на сжатие  $R_c$  песчаников (как водонасыщенных, так и сухих) в 1,5 раза выше, чем соответствующий предел прочности аргиллитов и алевролитов. Для отложений Северного и Центрального Кузбасса коэффициент размягчаемости  $K_s$  (отношение предела прочности в водонасыщенном состоянии к пределу прочности в сухом состоянии) для песчаников составляет в среднем 0,65; для отложений Южного Куз-

басса – 0,7–0,9. Для алевролитов и аргиллитов всех отложений Кузбасса средние значения  $K_s$  находятся в пределах 0,5–0,6.

Низкой степенью уплотнения обладают массивы, отсыпанные преимущественно из крепких песчаников. При этом нижние грубообломочные слои отвалов, сложенные кусками с наибольшим пределом прочности на сжатие и наименее подверженные физическому и химическому выветриванию, остаются в течение длительного времени в разрыхленном состоянии. Изменение размеров пор в таких слоях происходит преимущественно за счет постепенного заиливания мелкодисперсной массой, проникающей из верхних слоев.

Для численного моделирования насыпных породных массивов целесообразно перейти от функции  $F(d)$  распределения размеров кусков породы по объему (или по массе), теоретически обоснованной в работе [7], к функции распределения размеров кусков по числу частиц  $F_n(d)$ , где  $d$  – диаметр кусков, что описывается следующим выражением:

$$F_n(d) = \frac{\int_{d_0}^d \frac{1}{d^2} dF(d)}{\int_{d_0}^{d_1} \frac{1}{d^2} dF(d)}, \quad (3)$$

где  $d_0$  и  $d_1$  – наименьший и наибольший размеры кусков.

Для вычисления числа кусков  $i$ -й фракции предлагается формула:

$$N_i(d) = \frac{W_i}{d_i^2}, \quad (4)$$

где  $W_i$  – содержание  $i$ -й фракции (по объему) в массиве, %;  $d_i$  – средний диаметр кусков  $i$ -й фракции, м.

Анализ грансостава насыпных отвальных массивов показал, что суммарное содержание фракций (по объему) с размерами кусков меньше  $d$  аппроксимируется выражением:

$$W_{i(d)} = 81,5 \cdot d^{0,2754}. \quad (5)$$

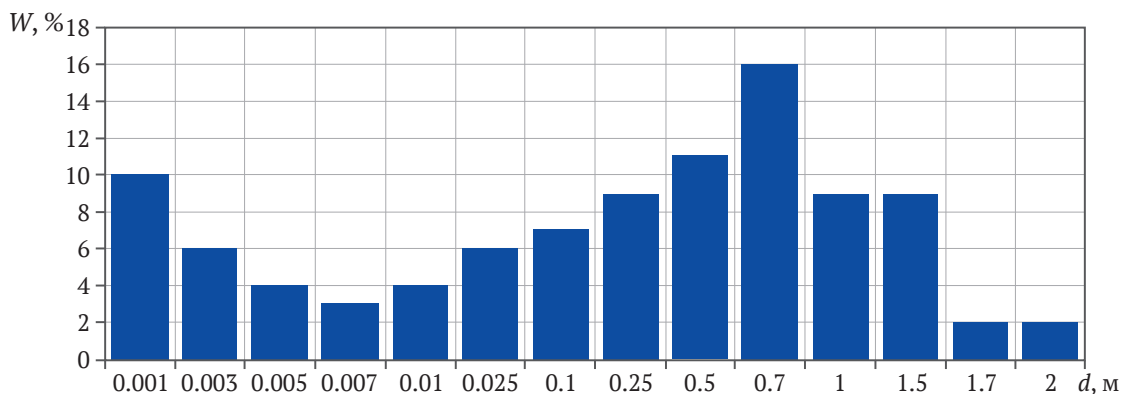


Рис. 2. Гистограмма дифференциального содержания кусков соответствующих фракций в отвале

Fig. 2. Histogram of the differential content of lumps of the corresponding fractions in the waste dump

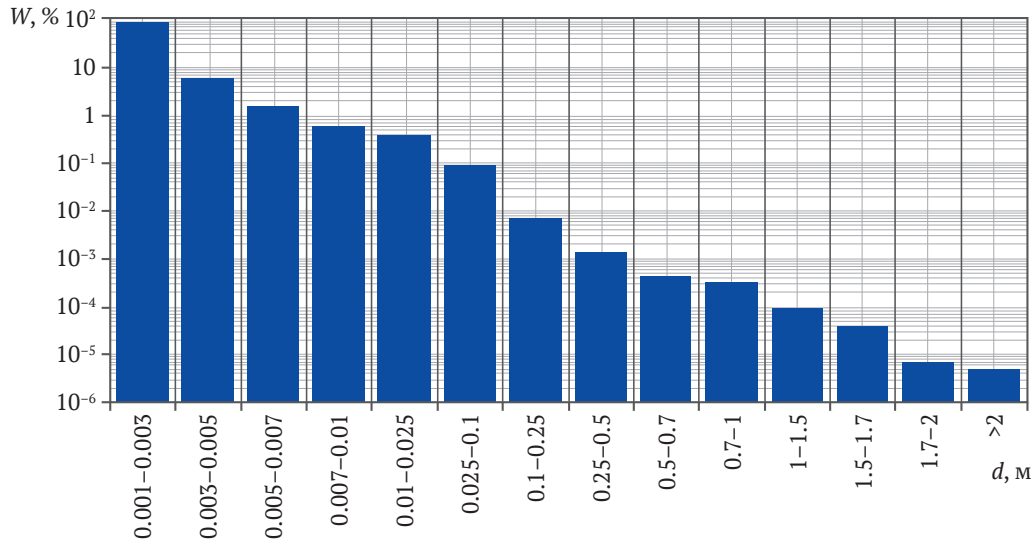


Рис. 3. Интегральное содержание  $W_{D(d)}$  фракций соответствующего диаметра  $d$  (по числу частиц)

Fig. 3. Integral contents  $W_{D(d)}$  of fractions of the corresponding diameter  $d$  (by number of particles)

Величина коэффициента корреляции регрессионной модели (5)  $R^2 = 0,991$ , что позволяет судить о достаточно высокой ее адекватности.

Интегральное процентное содержание  $W_{D(d)}$  фракций пород отвалов по числу частиц (усредненные значения для Северного, Среднего и Южного Кузбасса) представлено на рис. 3.

Значения интегрального содержания фракций  $W_{D(d)}$  по числу кусков аппроксимируются обратной степенной зависимостью:

$$W_{D(d)} = 9 \cdot 10^{-5} d^{-1,9699}. \quad (6)$$

Коэффициент корреляции регрессионной модели (6)  $R^2 = 0,9855$ .

Значения, полученные по формуле (6), интегрального содержания кусков по числу частиц используются в качестве исходных данных для определения размера кусков породы при численном моделировании насыпных массивов из разрушенных скальных и полускальных пород при использовании алгоритмов моделирования, не позволяющих учитывать данные granulометрического состава по объему или по массе [18, 20].

### Выводы

1. Неоднородное строение отвальных массивов в большинстве случаев обусловлено особенностью гравитационного массопереноса складированных в отвал пород, связанной с различной крупностью кусков коренных пород вскрыши.

Полевые наблюдения показали, что нижняя часть отсыпанных по бульдозерной периферийной или экскаваторной технологии отвальных массивов сформирована крупной фракцией со средним размером кусков  $d_{cp} = 0,8-1$  м, средняя часть – кусками породы размером  $d_{cp} = 0,4-0,6$  м, верхняя – преимущественно мелкой фракцией с размером кусков менее 0,1 м. Неоднородность физико-технических параметров фракционированных по высоте отвалов определяется неоднородностью их текстурных характеристик.

2. Соотношение длины, ширины и толщины у кусков взорванных горных пород составляет 1:0,85:0,8, что соответствует удлиненно-уплощенной форме частиц. Это требует значительного числа координат при описании положения кусков в массиве, а также учета моментов инерции при моделировании движения таких частиц до достижения ими устойчивого положения. Для учета неизометричной формы частиц при моделировании может быть использовано современное некоммерческое и коммерческое программное обеспечение при наличии необходимых аппаратных мощностей.

3. Выбор размера кусков  $d$  при математическом моделировании структуры насыпного массива производится либо по интегральному содержанию фракций в массиве по объему (или по массе) по зависимости  $W_{i(d)} = 81,5 \cdot d^{0,2754}$ , либо по интегральному содержанию фракций в массиве по числу частиц по зависимости  $W_{D(d)} = 9 \cdot 10^{-5} d^{-1,9699}$ .

### Список литературы

1. Васильева А. Д. *Инженерно-геологическое обоснование устойчивости высоких отвалов угольных месторождений Кузбасса*. [Автореф. дисс. ... канд. техн. наук]. СПб.: Санкт-Петербургский горный университет; 2020. 22 с.
2. Litvin O. I., Tyulenev M. A., Zhironkin S. A., Gasanov M. A. The influence of hydraulic backhoes' technological parameters on their capacity at overburden operations. *International Journal of Mining And Mineral Engineering*. 2020;11(3):203–217. <https://doi.org/10.1504/IJMMME.2020.109629>



3. Litvin O., Makarov V., Strelnikov A., Tyuleneva E. Study of the Backhoe's Digging Modes at Rock Face Working-Out. In: *IVth International Innovative Mining Symposium*. 14–16 October, 2019, Kemerovo, Russian Federation. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910501024>
4. Tyulenev M., Litvin O., Zhironkin S., Gasanov M. The influence of parameters of drilling and blasting operations on the performance of hydraulic backhoes at coal open pits in Kuzbass. *Acta Montanistica Slovaca*. 2019;24(2):88–97. URL: <https://actamont.tuke.sk/pdf/2019/n2/2tyulenev.pdf>
5. Чжан Шэнжун, Королёв В. А. Влияние гранулометрического состава на физические и физико-механические свойства песчано-гравийных грунтовых смесей. В: Трофимов В. Т., Королев В. А. (ред.) *Труды Международной научной конференции «Инженерно-геологическое и эколого-геологическое изучение песков и песчаных массивов»*. 27–28 сентября 2018. Москва, Российская Федерация. ООО «СамПринт»; 2018.
6. Макридин Е. В., Тюленев М. А., Марков С. О., Лесин Ю. В., Мурко Е. В. Использование вскрышных пород для повышения экологической безопасности угледобывающего региона. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2020;(12):89–102. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-12-0-89-102>
7. Бирюков А. В., Кузнецов В. И., Ташкинов А. С. *Статистические модели в процессах горного производства*. Кемерово: Кузбассвуиздат; 1996. 228 с.
8. Рыжков Ю. А., Орлов В. Н. Метод определения удельной поверхности кусковых закладочных материалов. *Известия вузов. Горный журнал*. 1975;(11):11–16.
9. Менжулин М. Г., Молдован Д. В., Борисенко Ю. Н., Легкова О. Е. Модель влияния естественных трещиноватости и блочности на взрывное разрушение горных пород. *Записки горного института*. 2007;(172):43–47. URL: <https://pmi.spmi.ru/index.php/pmi/article/view/7616>
10. Müller D., Liebling Th. M. Using triangulations in computer simulations of granular media. *Mathematical Modelling and Scientific Computing*. 1996;6. URL: [https://www.researchgate.net/publication/37428438\\_Using\\_triangulations\\_in\\_computer\\_simulations\\_of\\_granular\\_media](https://www.researchgate.net/publication/37428438_Using_triangulations_in_computer_simulations_of_granular_media)
11. Oger L., Troadec J. P., Richard P., Gervois A., Rivier N. Voronoï tessellation of packing of equal spheres. In: *Proceedings of the Third International Conference on Powders & Grains*. Durham, North Carolina; 1997. Pp. 287–290.
12. Воробьев В. А., Кивран В. К., Корякин В. П. *Применение физико-математических методов в исследовании свойств бетона*. М.: Высшая школа; 1977. 271 с.
13. Temperley H. N. V., Rowlinson J. S., Rushbrook G. S. (eds.) *Physics of simple liquids*. Amsterdam: North Holland Publishing Company; 1968. 713 p.
14. Bonaccorso F., Succi S., Lauricella M., Montessori A., Tiribocchi A., Luo K. H. Shear dynamics of confined bijels. *AIP Advances*. 2020;10:095304. <https://doi.org/10.1063/5.0021016>
15. Campello E. M. B. A computational model for the simulation of dry granular materials. *International Journal of Non-Linear Mechanics*. 2018;106:89–107. <https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2018.08.010>
16. Weinhart T., Orefice L., Post M. et al. Fast, flexible particle simulations – an introduction to MercuryDPM. *Computer Physics Communications*. 2019;249:107129. <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2019.107129>
17. Scholtes L., Donze F.-V. Modelling progressive failure in fractured rock masses using a 3D discrete element method. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*. 2012;52:18–30. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2012.02.009>
18. Бесимбаева О. Г., Хмырова Е. Н., Низаметдинов Ф. К., Олейникова Е. А. Оценка устойчивости бортового массива при отработке выходов угольного пласта. *Горные науки и технологии*. 2018;(2):51–59. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2018-2-51-57>
19. Марков С. О. *Структурное моделирование насыпных отвальных массивов разрезов Кузбасса*. [Дисс. ... канд. техн. наук]. Кемерово: Кузбасский государственный технический университет; 2003. 127 с.
20. Гоголин В. А., Лесин Ю. В. Обзор методов исследования устойчивости природных и техногенных массивов горных пород. *Техника и технология горного дела*. 2018;(3):42–55. <https://doi.org/10.26730/2618-7434-2018-3-42-55>
21. Калашников В. А., Горбачев А. В. Разработка низкочастотной технологии обезвоживания угольного шлама обогатительных фабрик с применением оболочечных фильтровальных конструкций. *Техника и технология горного дела*. 2019;(3):36–59. <https://doi.org/10.26730/2618-7434-2019-3-36-59>
22. Murko E., Kalashnikov V., Gorbachev A., Mukhomedzyanov I. Using of shell filtering constructions for concentrating plant's coal slurry dewatering. In: *IVth International Innovative Mining Symposium*. 14–16 October, 2019, Kemerovo, Russian Federation. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910502029>

## References

1. Vasilyeva A. D. *Geotechnical substantiation of high waste dumps stability at coal deposits of Kuzbass*. [Extended abstract of Cand. Sci. (Eng.) Dissertation.] St. Petersburg: St. Petersburg Mining University Publ.; 2020. 22 p. (In Russ.)
2. Litvin O. I., Tyulenev M. A., Zhironkin S. A., Gasanov M. A. The influence of hydraulic backhoes' technological parameters on their capacity at overburden operations. *International Journal of Mining And Mineral Engineering*. 2020;11(3):203–217. <https://doi.org/10.1504/IJMME.2020.109629>





3. Litvin O., Makarov V., Strelnikov A., Tyuleneva E. Study of the Backhoe's Digging Modes at Rock Face Working-Out. In: *IVth International Innovative Mining Symposium*. 14–16 October, 2019, Kemerovo, Russian Federation. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910501024>
4. Tyulenev M., Litvin O., Zhironkin S., Gasanov M. The influence of parameters of drilling and blasting operations on the performance of hydraulic backhoes at coal open pits in Kuzbass. *Acta Montanistica Slovaca*. 2019;24(2):88–97. URL: <https://actamont.tuke.sk/pdf/2019/n2/2tyulenev.pdf>
5. Zhang Shengzhong, Korolev V. A. Influence of grain size distribution on physical and physical-mechanical properties of sand-gravel soil mixtures. In: Trofimov V.T., Korolev V.A. (eds.). *Proceedings of the International Scientific Conference "Geotechnical and ecological-geological study of sands and sandy masses"*. September 27–28, 2018. Moscow: Russia LLC "SamPrint" Publ.; 2018. (In Russ.)
6. Makridin E. V., Tyulenev M. A., Markov S. O., Lesin Yu. V., Murko E. V. Overburden management towards higher safety in coal mining regions. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2020;(12):89–102. (In Russ.). <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-12-0-89-102>
7. Biryukov A. V., Kuznetsov V. I., Tashkinov A. S. *Statistical models in mining processes*. Kemerovo: Kuzbassvuzizdat Publ.; 1996. 228 p. (In Russ.)
8. Ryzhkov Yu. A., Orlov V. N. The method for determination of the specific surface of lumpy stowing materials. *Izvestiya Vuzov. Gornyi Zhurnal*. 1975;(11):11–16 (in Russian).
9. Menzhulin M. G., Moldovan D. V., Borisenko Y. N., Legkova O. E. Model of the influence of natural fracturing and blockiness on the explosive rupture of rocks. *Journal of Mining Institute*. 2007;(172):43–47. (In Russ.). URL: <https://pmi.spmi.ru/index.php/pmi/article/view/7616>
10. Müller D., Liebling Th. M. Using triangulations in computer simulations of granular media. *Mathematical Modelling and Scientific Computing*. 1996;6. URL: [https://www.researchgate.net/publication/37428438\\_Using\\_triangulations\\_in\\_computer\\_simulations\\_of\\_granular\\_media](https://www.researchgate.net/publication/37428438_Using_triangulations_in_computer_simulations_of_granular_media)
11. Oger L., Troadec J. P., Richard P., Gervois A., Rivier N. Voronoï tessellation of packing of equal spheres. In: *Proceedings of the Third International Conference on Powders & Grains*. Durham, North Carolina; 1997. Pp. 287–290.
12. Vorobyev V. A., Kivran V. K., Koryakin V. P. *Application of physical and mathematical methods in the study of concrete properties*. Moscow: Vysshaya Shkola Publ.; 1977. 271 p. (In Russ.)
13. Temperley H. N. V., Rowlinson J. S., Rushbrook G. S. (eds.) *Physics of simple liquids*. Amsterdam: North Holland Publishing Company; 1968. 713 p.
14. Bonaccorso F., Succi S., Lauricella M., Montessori A., Tiribocchi A., Luo K. H. Shear dynamics of confined bijels. *AIP Advances*. 2020;10:095304. <https://doi.org/10.1063/5.0021016>
15. Campello E. M. B. A computational model for the simulation of dry granular materials. *International Journal of Non-Linear Mechanics*. 2018;106:89–107. <https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2018.08.010>
16. Weinhart T., Orefice L., Post M. et al. Fast, flexible particle simulations – an introduction to MercuryDPM. *Computer Physics Communications*. 2019;249:107129. <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2019.107129>
17. Scholtes L., Donze F.-V. Modelling progressive failure in fractured rock masses using a 3D discrete element method. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*. 2012;52:18–30. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmmms.2012.02.009>
18. Bessimbaeva O. G., Khmyrova E. N., Nizametdinov F. K., Oleinikova E. A. Estimation of near-wall rock mass stability when extracting exposed coal seam. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2018;(2):51–59. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2018-2-51-57>
19. Markov S. O. *Structural modeling of piled dump masses of Kuzbass coal strip mines*. [Extended abstract of Cand. Sci. (Eng.) Dissertation.] Kemerovo: Kuzbass State Technical University; 2003. 127 p. (In Russ.)
20. Gogolin V. A., Lesin Yu. V. The research methods' review of the natural and tech-nogenic rock massifs stability. *Journal of Mining and Geotechnical Engineering*. 2018;(3):42–55. (In Russ.). <https://doi.org/10.26730/2618-7434-2018-3-42-55>
21. Kalashnikov V.A., Gorbachev A.V. Development of a low-cost technology for coal slurry dewatering from concentration plants with the use of shell filter constructions. *Journal of Mining and Geotechnical Engineering*. 2019;(3):36–59 (In Russ.). <https://doi.org/10.26730/2618-7434-2019-3-36-59>
22. Murko E., Kalashnikov V., Gorbachev A., Mukhomedzyanov I. Using of shell filtering constructions for concentrating plant's coal slurry dewatering. In: *IVth International Innovative Mining Symposium*. 14–16 October, 2019, Kemerovo, Russian Federation. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910502029>

### Информация об авторах

**Сергей Олегович Марков** – кандидат технических наук, доцент кафедры маркшейдерского дела и геологии, Горный институт, Кузбасский государственный технический университет им. Т. Ф. Горбачёва, г. Кемерово, Российская Федерация; Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева (филиал в г. Междуреченске), г. Междуреченск, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-3209-0296](https://orcid.org/0000-0002-3209-0296), Scopus ID [57193791816](https://scopus.org/57193791816), ResearcherID [L-3084-2017](https://orcid.org/L-3084-2017); e-mail [markovso@kuzstu.ru](mailto:markovso@kuzstu.ru)



**Елена Викторовна Мурко** – кандидат технических наук, начальник отдела аспирантуры, Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачёва, г. Кемерово, Российская Федерация; доцент кафедры технологии и комплексной механизации горных работ, Кузбасский государственный технический университет им. Т. Ф. Горбачёва (филиал), г. Прокопьевск, Российская Федерация; ORCID 0000-0001-9349-6874, Scopus ID 57194042949, ResearcherID AAE-2547-2019; e-mail zhev.httte@kuzstu.ru

**Федор Сергеевич Непша** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры электроснабжения горных и промышленных предприятий, Горный институт, Кузбасский государственный технический университет им. Т. Ф. Горбачёва, г. Кемерово, Российская Федерация; ORCID 0000-0002-7468-2548, Scopus ID 57197712059, ResearcherID R-6873-2016; e-mail nepshafs@kuzstu.ru

### Information about authors

**Sergey O. Markov** – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Surveying and Geology, Mining Institute, T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russian Federation; T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (branch in Mezhdurechensk), Mezhdurechensk, Russian Federation; ORCID 0000-0002-3209-0296, Scopus ID 57193791816, ResearcherID L-3084-2017; e-mail markovso@kuzstu.ru

**Elena V. Murko** – Cand. Sci. (Eng.), Head of the Postgraduate Study Department, T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russian Federation; Associate Professor of the Department of Technology and Integrated Mechanization of Mining Works, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (Prokopyevsk Branch), Prokopyevsk, Russian Federation; ORCID 0000-0001-9349-6874, Scopus ID 57194042949, ResearcherID AAE-2547-2019; e-mail zhev.httte@kuzstu.ru

**Fedor S. Nepsha** – Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher of the Department of Electricity Supply of Mining and Industrial Enterprises, Mining Institute, T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russian Federation; ORCID 0000-0002-7468-2548, Scopus ID 57197712059, ResearcherID R-6873-2016; e-mail nepshafs@kuzstu.ru


Поступила в редакцию	10.09.2021	Received	10.09.2021
Поступила после рецензирования	11.11.2021	Revised	11.11.2021
Принята к публикации	01.12.2021	Accepted	01.12.2021



## ГОРНЫЕ МАШИНЫ, ТРАНСПОРТ И МАШИНОСТРОЕНИЕ

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-4-267-276>**Увеличение ходимости редукторов мотор-колес карьерных самосвалов методом внедрения контроля фактического технического состояния**

А. А. Хорешок<sup>1</sup>   , А. В. Кудреватых<sup>1</sup>  , А. С. Ащеулов<sup>1</sup>  ,  
А. В. Винидиктов<sup>1</sup> , Л. И. Кантович<sup>2</sup> 

<sup>1</sup> Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева, г. Кемерово, Российская Федерация

<sup>2</sup> Национальный исследовательский технологический университет «Московский институт стали и сплавов» (НИТУ МИСЦ), г. Москва, Российская Федерация

✉ [haa.omit@kuzstu.ru](mailto:haa.omit@kuzstu.ru)

**Аннотация**

В настоящее время на угольных разрезах Кузбасса большое внимание уделяется улучшению качественных показателей горнодобывающей техники, включая надежность и долговечность составных узлов и агрегатов. Один из способов улучшения этих показателей – сокращение количества непредвиденных отказов, для достижения этой цели необходимо внедрить в технологическую карту технического обслуживания дополнительную операцию по диагностированию деталей карьерного самосвала. При этом необходимо, чтобы процесс диагностики не увеличивал время простоя техники, а эффективно выявлял состояние редукторов мотор-колес в процессе эксплуатации самосвалов. Целью исследования является увеличение надежности и ресурса редукторов мотор-колес крупногабаритных самосвалов БелАЗ. Выход из строя редуктора мотор-колеса хоть и является редким явлением, но стоимость нового такого агрегата может варьировать от 3,5 до 10 млн руб. Поэтому важно использовать такие методы диагностирования, которые позволят в кратчайшие сроки и без разборки узлов выявить состояние агрегатов. Определение фактического технического состояния редукторов мотор-колес возможно различными методами: виброакустическим; акустическим; тепловым; физико-химическим анализом отработавших эксплуатационных материалов. Исследования показали, что ни один из этих методов нельзя использовать в качестве универсального. При обосновании и выборе метода необходимо учитывать разные факторы, в том числе технологические, или использовать комбинацию методов, что сократит риски, но увеличит одновременно затраты. Необходимо разрабатывать более совершенный метод диагностирования, основанный на использовании нескольких методов одновременно.

**Ключевые слова**

угольный разрез, самосвал, надежность, вибродиагностика, тепловой режим, акустические параметры, анализ масла, Кемеровская область, Кузбасс

**Для цитирования**

Хорешок А. А., Кудреватых А. В., Ащеулов А. С., Винидиктов А. В., Кантович Л. И. Увеличение ходимости редукторов мотор-колес карьерных самосвалов методом внедрения контроля фактического технического состояния. *Горные науки и технологии*. 2021;6(4):267–276. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-4-267-276>

## MINING MACHINERY, TRANSPORT, AND MECHANICAL ENGINEERING

Research article

**Increasing life of pit dump truck motor-wheel gearboxes by introducing the monitoring of the actual technical condition**

А. А. Khoreshok<sup>1</sup>   , А. В. Kudrevatykh<sup>1</sup>  , А. С. Ashcheulov<sup>1</sup>  ,  
А. В. Vinidiktov<sup>1</sup> , Л. И. Kantovich<sup>2</sup> 

<sup>1</sup> T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russian Federation

<sup>2</sup> National University of Science and Technology “MISIS” (NUST “MISIS”), Moscow, Russian Federation

✉ [haa.omit@kuzstu.ru](mailto:haa.omit@kuzstu.ru)

**Abstract**

At present, Kuzbass coal strip mines pay great attention to improving quality performance of mining equipment operation, including reliability and durability of components and units. One of the ways of the performance improvement is decreasing number of unforeseen failures. To achieve this purpose a mine dump truck part diagnostics should be introduced into a maintenance service procedure. At the same time the process of





diagnostics should not increase the machinery downtime, but effectively reveal a condition of motor-wheel gearboxes in the course of dump truck operation. The aim of the research is to increase the reliability and service life of motor-wheel gearboxes of large BelAZ dump trucks. Failure of a motor-wheel gearbox is a rare phenomenon, but the cost of a new gearbox can vary from 3.5 to 10 million rubles. That is why it is important to implement such methods of diagnostics, which allow revealing the condition of gearboxes in the shortest possible time and without disassembling corresponding units. Determination of the actual technical condition of motor-wheel gearboxes is possible by different methods: vibroacoustic; acoustic; thermal; physical and chemical analysis of spent operating materials. The studies showed that none of these methods can be used as a universal one. When justifying and selecting the most suitable method, different factors should be considered, including technological, or a combination of methods should be applied, which will reduce risks, but at the same time increase costs. It is necessary to develop a better diagnostic method based on the use of several methods simultaneously.

### Keywords

coal strip mine, dump truck, reliability, vibration-based diagnostics, thermal conditions, acoustic parameters, oil analysis, Kemerovo region, Kuzbass

### For citation

Khoreshok A. A., Kudrevatykh A. V., Ashcheulov A. S., Vinidiktov A. V., Kantovich L. I. Increasing life of pit dump truck motor-wheel gearboxes by introducing the monitoring of the actual technical condition. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021;6(4):267–276. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-4-267-276>

## Введение

Кузбасс является лидером горнодобывающей промышленности и занимает ведущее место в России по добыче угля открытым способом. Так, согласно статистике за прошедший 2020 год было добыто свыше 220 млн т угля, при этом около 164 млн т добыто именно открытым способом [1–3]. Наиболее распространенным видом транспорта, применяемым при открытой добыче угля, является автомобильный. Это обусловлено тем, что он обладает рядом преимуществ по сравнению с другими видами транспорта: маневренность, высокая производительность и др.

Для перевозки полезных ископаемых на разрезах применяются крупногабаритные карьерные самосвалы. В Кузбассе предприятия по добыче ископаемых отдают предпочтение технике, произведенной на заводах ОАО «Белаз» [2, 4].

Для примера было взято ООО СП «Барзасское товарищество», добывающее коксующийся уголь на севере Кемеровской области. Из приведенных данных видно, что в течение 3 лет увеличивается парк карьерных самосвалов, при этом более 80 % составляют автомобили марки БелАЗ [5, 6].

Таблица 1 / Table 1

### Списочное количество самосвалов ООО СП «Барзасское товарищество»

List of dump trucks of JV Barzasskoye Partnership LLC

Марка самосвала	2018	2019	2020
БелАЗ-7555	4	0	6
БелАЗ-75131	50	50	65
Komatsu HD785	8	8	10

Анализ работы карьерных самосвалов на разрезах ООО СП «Барзасское товарищество», показал, что до 23 % общего времени простоев приходится на отказы редуктора мотор-колеса. Одной из ведущих статей расхода являются траты на его ремонт и приобретение. Выход из строя данного узла карьерного

самосвала хоть и является редким явлением, но стоимость нового такого агрегата может варьировать от 3,5 до 10 млн руб. [7, 8].

Таблица 2 / Table 2

### Статистика выходов редуктора мотор-колеса из строя в ООО СП «Барзасское товарищество»

Statistics of motor-wheel gearbox failures  
in JV Barzasskoye Partnership LLC

Год	2018	2019	2020
Количество редукторов мотор-колеса, вышедших из строя	39	56	36

Таким образом, возникает необходимость внедрения средств по контролю за фактическим техническим состоянием данного узла [9, 10]. Кроме того, диагностика должна осуществляться не только безразборным способом, но также и без вывода карьерного самосвала с линии по добыче полезных ископаемых.

В процессе эксплуатации в узлах механизмов и машин протекает два взаимосвязанных процесса: трение и износ, которые являются основными причинами снижения ходимости техники в целом. В результате этих процессов происходит либо разрушение поверхностного слоя, либо прилипание продуктов износа к трущимся поверхностям. Оба этих явления приводят к нарушению зазоров между контактируемыми деталями [11, 12] и изменениям в работе механизма: уровня шума узла, вибрациям, температурного режима и др. Вот почему необходимо использовать такие средства диагностики, которые могут фиксировать эти физические параметры.

В ряде исследований учеными были определены наиболее эффективные методы диагностики узлов и агрегатов:

- виброакустический;
- акустический;
- тепловой;
- физико-химический анализ отработавших эксплуатационных материалов [13–15].

### Задачи исследований

Задачами данного исследования являются проведение сравнительного анализа существующих непрерывных методов определения фактического технического состояния редукторов мотор-колес и обоснование выбора метода для внедрения его на производстве.

### Методология исследований

*Виброакустический метод диагностики.* Этот метод базируется на анализе колебаний, вызванных акустическими и вибрационными явлениями, которые возникают в процессе работы сложных механизмов. Одним из его главных достоинств является возможность диагностирования агрегата без необходимости его разборки. Существует множество деталей, работающих по различным схемам движения, поэтому выявляются несколько причин, вызывающих колебания механизмов. В узлах и механизмах, совершающих вращательное движение, причинами возникновения колебаний чаще всего являются дисбаланс, возникающий из-за некачественного ремонта деталей агрегата, или увеличивающееся в процессе работы механизма повышенное изнашивание сопрягающихся поверхностей и, как следствие, смещение центра тяжести деталей [16]. Колебания, возникающие из-за этого, сопровождаются перемещениями с большой амплитудой, малыми ускорениями и более низкими, по сравнению с другими, частотами вибрации. Частота вибрации напрямую зависит от скорости механизма и является характерной чертой этого вида колебаний. Данная особенность позволяет ее легко выделить из общего фона вибраций и локально обнаружить. Частота вибраций механизма равняется частоте вращения вала, на котором присутствует несбалансированная масса. Второй причиной колебаний являются соударения деталей. В результате ударов деталей друг о друга возникают колебания с высокой частотой, с меньшими амплитудами и вы-

сокими ускорениями. При этом виде диагностирования выводится диаграмма, на которой показана зависимость периода колебаний от амплитуды. Чем сильнее увеличивается амплитуда колебаний, тем, соответственно, сильнее колеблется механизм.

В базовой системе вибродиагностики редуктора мотор-колеса заложены два основополагающих компонента. Первый – это аппаратурно-программная часть, которая реализует алгоритмы съема, обработки информации и анализа технических измерений с выдачей диагностических решений о техническом состоянии объекта для диагностики [16, 17]. Второй – это сам объект диагностирования с показателями технического состояния, которое может быть хорошим, допустимым и недопустимым. На данной основе строится система распознавания неисправностей, связывающая снятые с агрегата вибрационные параметры с конкретными неисправностями и возможными выходами из строя редуктора мотор-колеса.

Виброакустическая диагностика проводится с помощью прибора «ДИАМЕХ 2000».

*Метод акустической диагностики.* Существует метод акустической диагностики агрегатов и узлов механизмов, который основан на сравнении шума или вибрации исследуемого механизма с эталоном.

По такому способу сначала измеряют интегральный уровень шума, затем вычисляют автокорреляционную функцию сигнала, делают спектральный анализ шума и вычисляют статистические характеристики: закон распределения амплитуд и частот, корреляционную функцию или спектральную плотность [12].

При этом сигналы, излучаемые исследуемым механизмом в заданном режиме работы, сравниваются с заранее определенным классом сигналов, которые соответствуют различному техническому состоянию механизма. Однако применение известных способов в одних случаях не дает возможности определить техническое состояние механизма машины с достаточной



Рис. 1. Прибор для диагностирования редуктора мотор-колеса «ДИАМЕХ 2000»

Fig. 1. DIAMEX 2000 instrument for diagnostics of a motor-wheel gearbox



Рис. 2. Прибор для акустического диагностирования редуктора мотор-колеса Ассистент

Fig. 2. ASSISTANT instrument for acoustic diagnostics of a motor-wheel gearbox

точностью, а в других требует применения сложной специальной электронной аппаратуры для вычисления статистических характеристик сигналов и сравнения их с характеристиками сигналов эталонных состояний механизмов [14]. Кроме того, при определении местоположения источника сигнала повышенного уровня требуется проведение сложных вычислений.

Известные способы часто заключаются в том, что посредством датчиков преобразовывают акустический шум в электрические сигналы, производят визуализацию этих сигналов посредством осциллографа и по изображению на экране осциллографа судят о результатах контроля.

Данный метод эффективен потому, что нет необходимости в разборке редуктора мотор-колеса, достаточно подключить оборудование и произвести замеры необходимых величин [17].

Акустическая диагностика редуктора мотор-колеса проводится с помощью прибора Ассистент, который позволяет достаточно точно определить состояние агрегата, дать прогноз по его дальнейшей эксплуатации, таким образом, снизить затраты на покупку и ремонт редукторов и, соответственно, сократить время простоя самосвалов в ремонтных зонах [1, 18].

*Тепловой метод* контроля фактического технического состояния редукторов мотор-колес крупногабаритных карьерных самосвалов основывается на проведении замеров температуры исследуемого узла в процессе его эксплуатации. Во время работы карьерной техники возникают процессы, приводящие к нарушению нормативных зазоров между контактирующими деталями. В результате этого увеличивается скорость износа, из-за чего усиливается процесс трения и, как следствие, повышается температура редуктора. Но, помимо повышения температуры всего механизма, также будут возникать локальные перегревы в местах соприкосновения более изношенных деталей. Таким образом, применение тепловизора позволяет фиксировать происходящие изменения в техническом состоянии редукторов [14].

Физико-химический анализ эксплуатируемого трансмиссионного масла в редукторе мотор-колеса ба-

зируется на тех же принципах изнашивания и трения, что и предыдущие способы диагностики. Но у него есть свои особенности. Так, в процессе трения деталей агрегата происходит изнашивание поверхностей, продукты которого удаляются из места контакта с помощью масла. А так как масло в агрегатах используется циклично, то в течение времени оно накапливает в себе все металлические примеси [19]. В данном методе контроля масло выступает в роли индикатора уровня износа трущихся пар. Проведение анализа по определению процентного содержания примеси позволяет оценить не только качество масла, его остаточный ресурс, но также по косвенным признакам дать заключение о фактическом состоянии редуктора. Кроме того, зная материалы, из которых изготавливаются шестерни, можно выявить конкретную деталь с повышенным износом, так как содержание именно этого материала будет преобладать в трансмиссионном масле.

### Результаты исследований

Экспериментальные исследования виброакустического, акустического и теплового методов диагностики редукторов мотор-колес карьерных самосвалов БелАЗ осуществлялись на технике АО «Салек».

Методы виброакустической и акустической диагностики являются взаимодополняющими, так как причины, по которым возникают вибрации и шумы, идентичны и связаны между собой. Оба этих физических параметра работы редуктора присутствуют постоянно. Даже на исправном агрегате они есть, но только их уровень минимален. Следовательно, перед внедрением и применением этих методов необходимо провести контрольные измерения на нескольких исправных автомобилях, чтобы в дальнейшем проводить сравнение диагностируемых машин [14, 18–20].

Метод крепления прибора для замера уровня вибрации представлен на рис. 1. Прибор, используемый для определения фактического технического состояния редукторов мотор-колес, устанавливается на внутренний обод диска колеса, а считывающий датчик вкручивается в корпус редуктора. Результаты измерений изображены на диаграммах (рис. 3, 4).

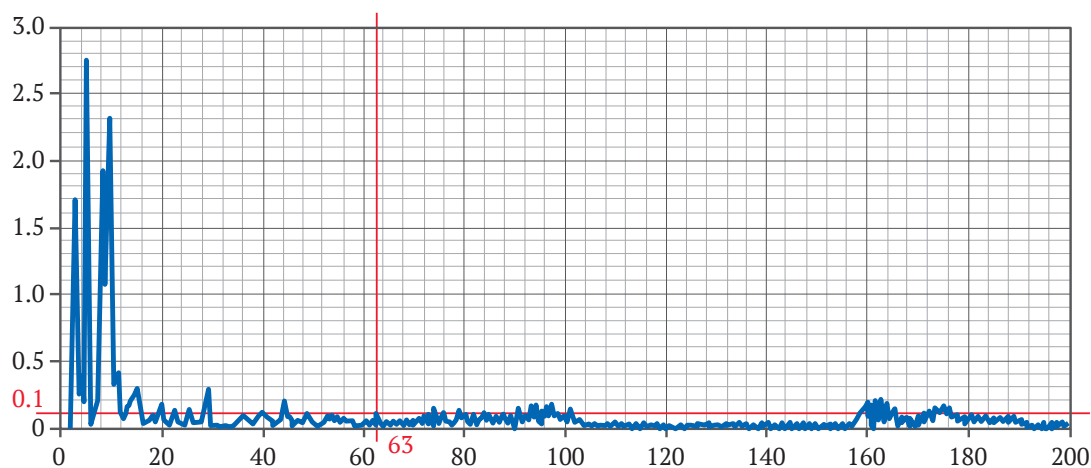


Рис. 3. Диаграмма замера уровня вибрации исправного редуктора

Fig. 3. Diagram of gearbox vibration level measurement



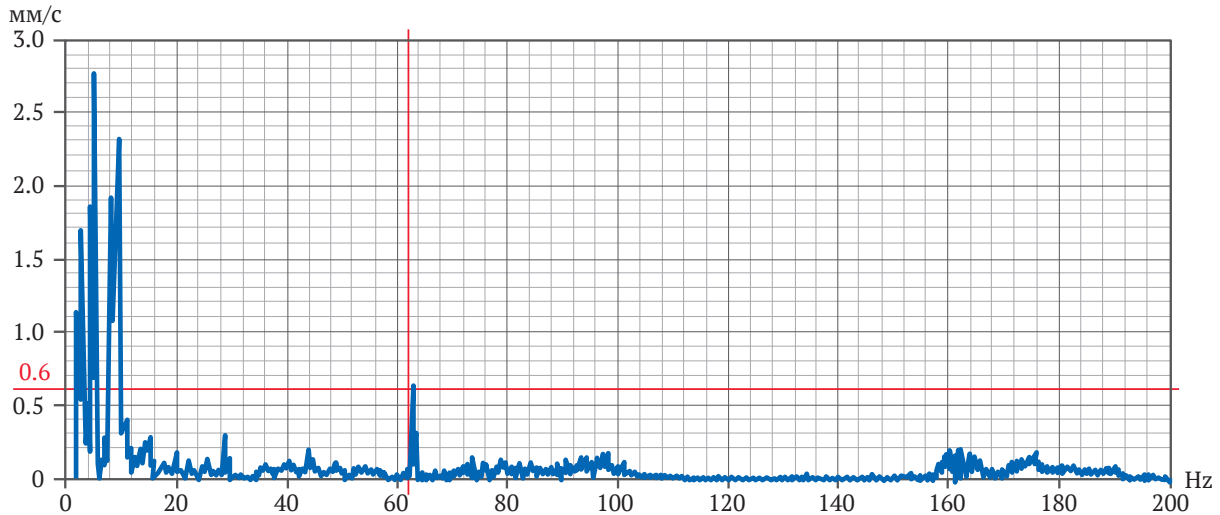


Рис. 4. Диаграмма замера уровня вибрации изношенного редуктора

Fig. 4. Diagram of worn gearbox vibration level measurement

На графике по вертикали располагается шкала уровня вибрации (мм/с), а на горизонтальной оси расположена шкала частоты (Гц). Анализируя полученные данные, можно сделать вывод о том, что при частоте 63 Гц наблюдается рост вибрации. На основе этих измерений делается заключение о возникновении неисправностей в диагностируемом узле. Но главный недостаток применения такого метода диагностики заключается в том, что нет возможности определить, какая деталь редуктора выходит из строя и какова степень ее износа. Для решения этой проблемы необходимо провести большое количество экспериментальных исследований для каждой марки автомобиля с последующим разбором редуктора мотор-колеса. Только при таком условии можно будет прогнозировать остаточный ресурс. Данный метод контроля позволяет отслеживать изменения в редукторе, то есть момент возникновения неисправности, а также скорость изменения состояния [14, 18–20].

Одновременно с диагностикой по уровню вибрации с помощью прибора «Ассистент SI V1» проводился замер такого параметра, как шум в редукторе. Прибор «Ассистент SI V1» устанавливается аналогично прибору «Диамех 2000» на внутренний обод диска колеса карьерного самосвала (см. рис. 2). Результаты проведенных измерений представлены на графиках ниже (рис. 5, 6).

На диаграммах по горизонтальной оси измеряется частота (Гц), а по вертикальной – уровень шума (дБ) работы редуктора. Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод о том, что при частоте 63 Гц на неисправном редукторе мотор-колеса наблюдается повышенный шум (105 дБ) в сравнении с исправным (93 дБ). Так же как и при виброакустической диагностике, в диапазоне 63 Гц происходит фиксация неисправности. Таким образом, подтверждается взаимосвязь этих двух процессов [14, 18–20].

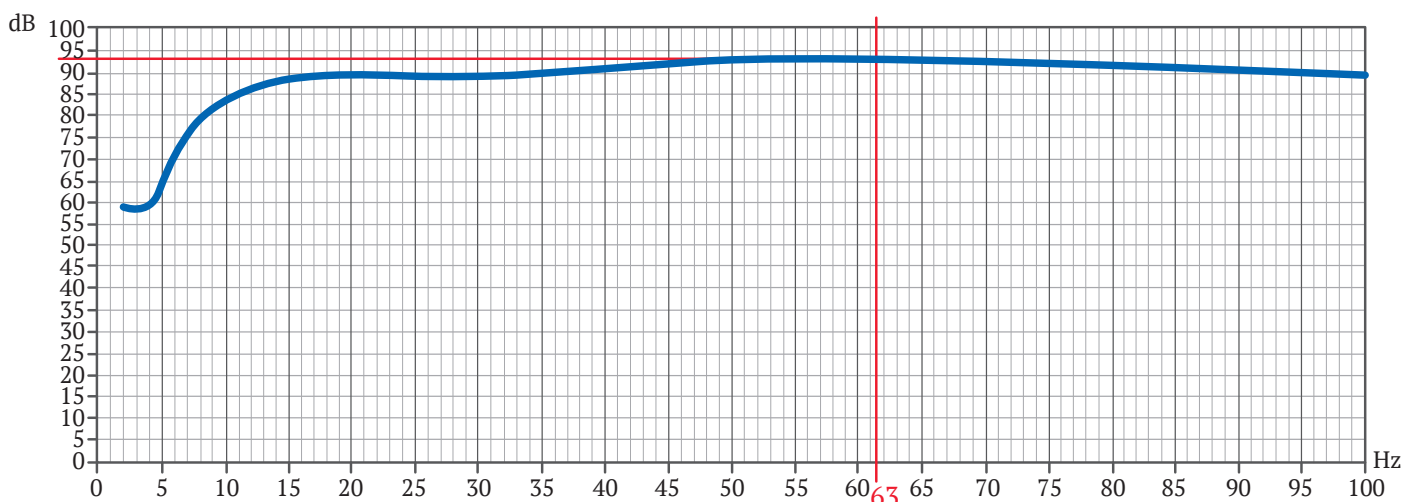


Рис. 5. Изменение шума исправного редуктора мотор-колеса

Fig. 5. Changing noise level of serviceable motor-wheel gearbox

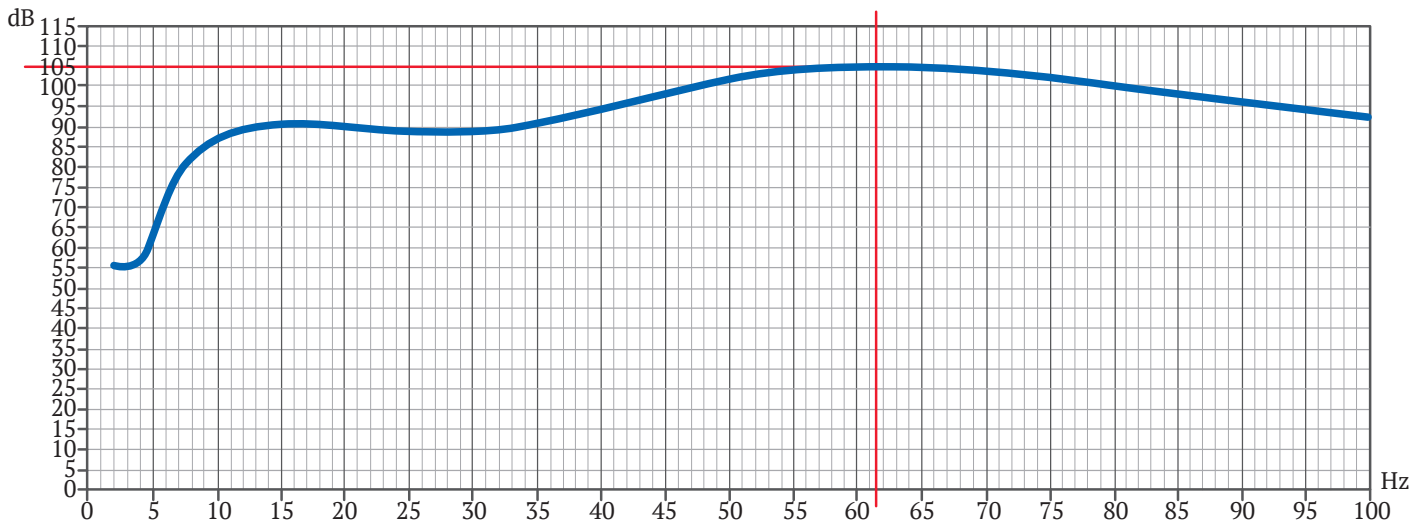


Рис. 6. Изменение шума неисправного редуктора мотор-колеса

Fig. 6. Changing noise level of malfunctioning motor-wheel gearbox

Следующим методом контроля технического состояния редуктора мотор-колеса является диагностика с помощью тепловизионной фотосъемки. Данный способ реализуется с помощью тепловизора «Testo 870». Для оценки результатов (рис. 7, 8) проведенного диагностирования использовались те же редукторы, что и в предыдущих двух способах.

Как видно из температурных диаграмм, на неисправном редукторе температура выросла на 5 °С. Особенность этого способа контроля технического состояния редукторов заключается в быстроте его проведения, при этом нет необходимости устанавливать дополнительное оборудование на карьерный самосвал, можно осуществлять температурный контроль непосредственно на работающем транспорте. Также возможно локальное определение неисправности,

так как узлы, подверженные большему износу, будут более нагретыми. Главный недостаток теплового контроля заключается в невозможности спрогнозировать остаточный ресурс редуктора и определить неисправный элемент [14, 18–20].

Апробация метода контроля фактического технического состояния редуктора мотор-колеса карьерных самосвалов БелАЗ на основе физико-химического анализа трансмиссионного масла проводилась на АО «УК Кузбассразрезголь».

Исследования физико-химического анализа трансмиссионного масла из редуктора мотор-колеса проводились на крупногабаритном карьерном самосвале БелАЗ-75131. Цель данных экспериментов – определение применимости данного метода для контроля технического состояния редукторов, а также

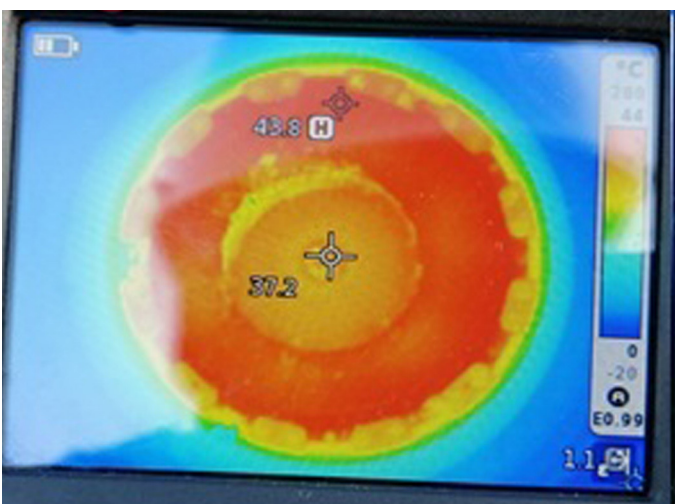


Рис. 7. Измерение температуры исправного редуктора мотор-колеса

Fig. 7. Measuring temperature of serviceable motor-wheel gearbox

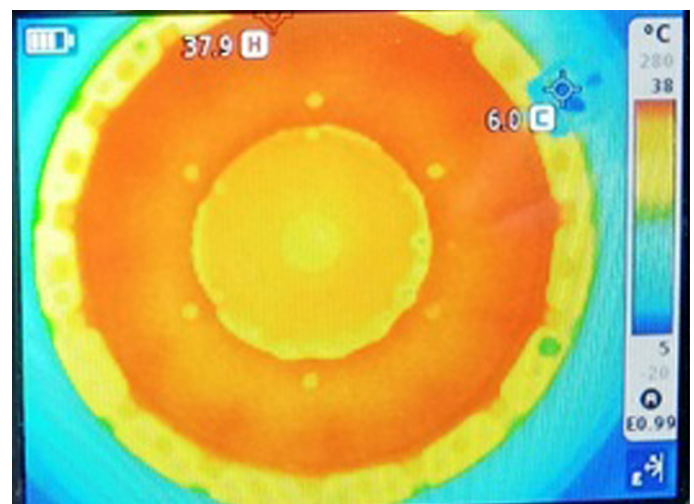


Рис. 8. Измерение температуры неисправного редуктора мотор-колеса

Fig. 8. Measuring temperature of malfunctioning motor-wheel gearbox

отслеживание скорости накопления различных примесей в эксплуатируемом масле. Оценку состояния масла проводили по количеству примесей с применением многоканальной фотометрической системы МФС-7. С целью выявления наиболее оптимального интервала забора проб масла проведена предварительная работа, в результате которой было выявлено, что интервал в 50 моточасов наиболее показателен, так как позволяет в динамике отслеживать рост примесей в масле.

Отбор проб проводился с помощью шприца-отборника через технологическое отверстие, сделанное в крышке редуктора. Результаты физико-химического анализа трансмиссионного масла представлены на рис. 9.

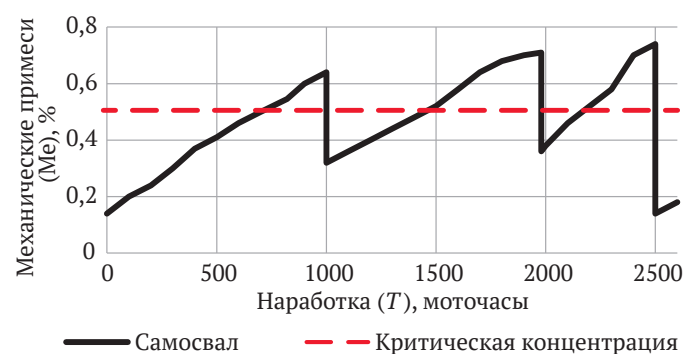


Рис. 9. График изменения содержания механических примесей в трансмиссионном масле

Fig. 9. Content of metal impurities in gearbox oil as a function of operation time (hours)

На рисунке представлен график зависимости количества механических примесей в эксплуатируемом трансмиссионном масле от наработки большегрузного карьерного самосвала. На вертикальной оси отображается процентное содержание примесей по массе, а на горизонтальной оси – наработка в моточасах [14, 18–20].

Из анализа графика можно сделать вывод о наличии резкого снижения количества примесей в масле при наработке в 1000 и 2000 моточасов. Это обусловлено необходимостью технического долива масла в редуктор. Наибольшее снижение наблюдается при наработке в 2500 моточасов. Данное явление объясняется требованием завода производителя по периодичности полной замены трансмиссионного масла в редукторе мотор-колеса.

Дополнительная горизонтальная линия на графике на уровне 0,5 % – содержание механических примесей, отображает критический уровень примесей в трансмиссионном масле. Именно при таком содержании наблюдаются повышенный рост изнашивания трущихся деталей редуктора, а также рост температуры масла.

Несмотря на снижение уровня примесей при технологических доливках масла, наблюдается линейный рост механических примесей. Это обуславливается естественным износом контактирующих пар в редукторе. При этом наклон кривой очень значительный, и достаточное время редуктор работает на масле, со-

держащем примесей выше критической отметки, что, в свою очередь, негативно сказывается на ходимости редукторов мотор-колес [14, 18–20].

Результаты метода диагностирования редуктора мотор-колеса с помощью физико-химического анализа трансмиссионного масла позволяют внедрять данный метод диагностики в технологический процесс технического обслуживания и ремонта крупногабаритных карьерных самосвалов. Но при использовании этого метода необходимо учитывать главный его недостаток: при полной замене масла происходит обновление системы «редуктор-масло» от накопленных металлических примесей. Таким образом, его необходимо применять неоднократно и фиксировать не только количество примесей, но и угол наклона кривой, то есть скорость накопления продуктов износа. Это будет свидетельствовать о начавшемся повышенном износе трущихся поверхностей.

### Заключение

Проведенный анализ причин отказов карьерных самосвалов на предприятиях по добыче угля в Кузбассе выявил, что необходимо разрабатывать и внедрять технологическую операцию по диагностированию фактического технического состояния редукторов мотор-колес крупногабаритных карьерных самосвалов. Это обусловлено тем, что время простоев, связанное с выходом из строя данного узла, составляет больше 20 % от общего времени простоев.

Среди существующих методов контроля технического состояния выделяют четыре наиболее эффективных. Но их применение ограничено рядом факторов:

1. Виброакустический и акустический методы имеют общую природу возникновения и, как следствие, схожие результаты. Таким образом, применять обе методики не имеет смысла.

2. Виброакустический и акустический методы требуют дополнительного вмешательства в конструкцию редуктора мотор-колеса. Кроме того, в процессе замеров параметров возможно повреждение диагностического прибора, так как он располагается с наружной стороны самосвала.

3. Виброакустический и акустический методы диагностики позволяют не только определить наличие неисправности в редукторе мотор-колеса, но и отслеживать в динамике изменения его технического состояния. При этом оба этих метода не могут указать на характер отказа, только на его наличие.

4. Тепловая диагностика является эффективным по скорости произведения замеров методом, так как для работы с тепловизором не требуется остановки работы карьерного самосвала. Но при этом данный способ контроля технического состояния только локализует неисправность, возникшую в редукторе, утверждать, какая составная единица редуктора вышла из строя, можно только по косвенным признакам.

5. Физико-химический анализ эксплуатируемого трансмиссионного масла редуктора мотор-колеса является наиболее информативным, по сравнению с остальными, но при этом и более трудозатратным. Это связано с тем, что для забора проб масла необхо-





димо останавливать карьерный самосвал, также понадобится химическая лаборатория, которая сможет производить этот анализ. Еще один недостаток этого метода – регламентная замена масла в редукторе, при которой происходит удаление всех накопившихся продуктов износа, что, в свою очередь, не позволяет постоянно отслеживать изменения состояния редуктора.

На основе вышесказанного можно сделать вывод о том, что нет универсального метода контроля фактического технического состояния редуктора мотор-колеса карьерного самосвала. Необходимо либо разрабатывать более совершенный метод диагностирования, либо применять несколько способов одновременно.

### Список литературы

1. Dadonov M., Kulpin A., Ostanin O., Suleimenov E. Distribution of static normal reactions to wheels of open-pit dump trucks depending on the longitudinal and cross sections of the open-pit road. In: *E3S Web of Conferences. IVth International Innovative Mining Symposium*. 2019;105:03009. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910503009>
2. Рябко К. А., Гутаревич В. О. Обоснование технико-экономических показателей шахтных моно-рельсовых локомотивов. *Горные науки и технологии*. 2021;6(2):136–143. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-2-136-143>
3. Кузин Е. Г., Пудов Е. Ю., Дубинкин Д. М. Анализ отказов узлов карьерных самосвалов в условиях эксплуатации. *Горное оборудование и электромеханика*. 2021;(2):55–61. <https://doi.org/10.26730/1816-4528-2021-2-55-61>
4. Таразанов И. Г., Губанов Д. А. Итоги работы угольной промышленности России за январь–декабрь 2019 года. *Уголь*. 2020;(3):54–69. <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2020-3-54-69>
5. Kosolapov A., Krysin S. The raising influence of information technologies on professional training in the sphere of automated driving when transporting mined rock. In: *E3S Web of Conferences. The Second International Innovative Mining Symposium*. 2017;21:03012. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20172103012>
6. Dadonov M., Kulpin A., Borovtsov V., Zhunusbekova A. Effect of aerodynamic loads on redistribution of normal reactions of quarry dump trucks tires. In: *E3S Web of Conferences. Vth International Innovative Mining Symposium*. 2020;174:03018. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017403018>
7. Чичерин И. В., Федосенков Б. А., Сыркин И. С., Садовец В. Ю., Дубинкин Д. М. Концепция управления беспилотными транспортными средствами в условиях открытых горных работ. *Известия вузов. Горный журнал*. 2020;(8):109–120. <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2020-8-109-120>
8. Gerike B. L., Klishin V. I., Gerike P. B., Drozdenko Y. V. Safety of heavy-duty dump trucks in operation. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Scientific and Research Conference on Knowledge-based technologies in development and utilization of mineral resources*. 4–7 June 2019, SibSIU. Novokuznetsk, Russia. 2019;377:012017. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/377/1/012017>
9. Khazin M. L., Furzikov V. V., Tarasov P. I. Increasing mining dump trucks operation efficiency with the use of gas piston engines. *Izvestiya Vuzov. Gornyi Zhurnal*. 2020;(2):77–85. <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2020-2-77-85>
10. Дубов Г. М., Богомолов А. Р., Григорьева Е. А., Нохрин С. А. Анализ причин роста концентрации свинца в отработавшем масле ДВС КТА 50 карьерных самосвалов БелАЗ 75131, работающих по газодизельному циклу. *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. 2021;(3):84–93. <https://doi.org/10.26730/1999-4125-2021-3-84-93>
11. Панасенков Д. А., Зайцев А. П., Пикалов Н. А., Карташов А. Б., Дубинкин Д. М. Разработка критериев обеспечения гидравлических процессов в узких каналах гидросистемы при создании новых карьерных самосвалов. *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. 2020;(6):98–108. <https://doi.org/10.26730/1999-4125-2020-6-98-108>
12. Кусургашева Л. В., Муромцева А. К., Баканов А. А., Прокопенко Е. В. Циклические факторы и системные ограничения развития угольной промышленности России. *Уголь*. 2020;(10):33–39. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2020-10-33-39>
13. Дубинкин Д. М., Садовец В. Ю., Котиев Г. О., Карташов А. В. Исследование процесса транспортирования вскрышных пород и угля на разрезах. *Техника и технология горного дела*. 2019;(4):50–66. <https://doi.org/10.26730/2618-7434-2019-4-50-66>
14. Кудреватых А. В., Ащеулов А. С., Ащеулова А. С. Сравнительная характеристика процесса износа редукторов экскаваторов и карьерных самосвалов. *Горное оборудование и электромеханика*. 2020;(5):51–56. <https://doi.org/10.26730/1816-4528-2020-5-51-56>
15. Грабский А. А., Сергеев В. Ю., Грабская Е. П. Обоснование выбора стратегии технического обслуживания и ремонтов карьерных экскаваторов. *Уголь*. 2021;(2):14–17. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2021-2-14-17>
16. Лель Ю. И., Глебов И. А., Мусихина О. В., Ганиев Р. С., Хардик Н. В. Энергетический метод оценки и систематизации условий эксплуатации карьерного автотранспорта. *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. 2020;(8):14–25. <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2020-8-14-25>



17. Кудреватых А. В., Фурман А. С., Ащеулов А. С., Ащеулова А. С., Карнадуд О. С. Методы диагностирования фактического технического состояния редуктора мотор-колеса БелАЗ. *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. 2021;(2):23–28. <https://doi.org/10.26730/1999-4125-2021-2-23-28>
18. Кудреватых А. В., Ащеулов А. С., Ащеулова А. С. Методика определения технического состояния редукторов мотор-колеса автосамосвалов БЕЛАЗ по параметрам масла. *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. 2020;(1):49–55. <https://doi.org/10.26730/1999-4125-2020-1-49-55>
19. Бурков В. Н., Буркова И. В., Засканов В. Г. Метод сетевого программирования в задачах календарного планирования. *Автоматика и телемеханика*. 2020;(6):17–28. <https://doi.org/10.31857/S0005231020060025> (Пер. вер.: Burkov V. N., Burkova I. V., Zaskanov V. G. The network programming method in project scheduling problems. *Automation and Remote Control*. 2020;81:978–987. <https://doi.org/10.1134/S000511792006003X>)
20. Герике П. Б., Герике Б. Л. Формирование единого диагностического критерия для оценки технического состояния горного оборудования. *Горное оборудование и электромеханика*. 2021;(2):17–22. <https://doi.org/10.26730/1816-4528-2021-2-17-22>

## References

1. Dadonov M., Kulpin A., Ostanin O., Suleimenov E. Distribution of static normal reactions to wheels of open-pit dump trucks depending on the longitudinal and cross sections of the open-pit road. In: *E3S Web of Conferences. IVth International Innovative Mining Symposium*. 2019;105:03009. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910503009>
2. Ryabko K. A., Gutarevich V. O. Substantiation of performance indicators of mine monorail locomotives. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021;6(2):136–143. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-2-136-143>
3. Kuzin E. G., Pudov E. Yu., Dubinkin D. M. Analysis of failures of mining dump truck components under operating conditions. *Journal of Mining Equipment and Electromechanics*. 2021;(2):55–61. <https://doi.org/10.26730/1816-4528-2021-2-55-61>
4. Tarazanov I. G., Gubanov D. A. Russia's coal industry performance for January – December, 2019. *Ugol'*. 2020;(3):54–69. <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2020-3-54-69>
5. Kosolapov A., Krysin S. The raising influence of information technologies on professional training in the sphere of automated driving when transporting mined rock. In: *E3S Web of Conferences. The Second International Innovative Mining Symposium*. 2017;21:03012. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20172103012>
6. Dadonov M., Kulpin A., Borovtsov V., Zhunusbekova A. Effect of aerodynamic loads on redistribution of normal reactions of quarry dump trucks tires. In: *E3S Web of Conferences. Vth International Innovative Mining Symposium*. 2020;174:03018. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017403018>
7. Chicherin I. V., Fedosenkov B. A., Syrkin I. S., Sadovets V. I., Dubinkin D. M. The concept of controlling the unmanned vehicles in open pit mining. *Izvestiya Vuzov. Gornyi Zhurnal*. 2020;(8):109–120. (In Russ.). <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2020-8-109-120>
8. Gerike B. L., Klishin V. I., Gerike P. B., Drozdenco Y. V. Safety of heavy-duty dump trucks in operation. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Scientific and Research Conference on Knowledge-based technologies in development and utilization of mineral resources*. 4–7 June 2019, SibSIU. Novokuznetsk, Russia. 2019;377:012017. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/377/1/012017>
9. Khazin M. L., Furzikov V. V., Tarasov P. I. Increasing mining dump trucks operation efficiency with the use of gas piston engines. *Izvestiya Vuzov. Gornyi Zhurnal*. 2020;(2):77–85. <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2020-2-77-85>
10. Dubov G. M., Bogomolov A. R., Grigorieva E. A., Nokhrin S. A. Analysis of the reasons for the lead concentration increase in waste oil of ice KTA 50 of BelAZ 75131 gas-diesel open-pit dump trucks. *Bulletin KuzSTU*. 2021;(3):84–93. (In Russ.). <https://doi.org/10.26730/1999-4125-2021-3-84-93>
11. Panasenkov D. A., Zaitsev A. P., Pikalov N., Dubinkin D. M. Development of criteria for ensuring hydraulic processes in narrow channels of the hydraulic system when creating new quarry dump trucks. *Bulletin KuzSTU*. 2020;(6):98–108. (In Russ.). <https://doi.org/10.26730/1999-4125-2020-6-98-108>
12. Kusurgasheva L. V., Muromtseva A. K., Bakanov A. A., Prokopenko E. V. Cyclic factors and system restrictions for coal industry development in Russia. *Ugol'*. 2020;(10):33–39. (In Russ.). <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2020-10-33-39>
13. Dubinkin D. M., Sadovets V. Yu., Kotiev G. O., Kartashov A. V. Overburden and coal transportation research at open pit mines. *Journal of Mining and Geotechnical Engineering*. 2019;(4):50–66. (In Russ.). <https://doi.org/10.26730/2618-7434-2019-4-50-66>
14. Kudrevatykh A. V., Ashcheulov A. S., Ashcheulova A. S. The wear phenomena comparative characteristics of excavators and dump trucks gearboxes. *Journal of Mining Equipment and Electromechanics*. 2020;(5):51–56. (In Russ.). <https://doi.org/10.26730/1816-4528-2020-5-51-56>
15. Grabsky A. A., Sergeev V. Yu., Grabskaya E. P. Rationale for choosing a strategy for maintenance and repair of quarry excavators. *Ugol'*. 2021;(2):14–17. (In Russ.). <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2021-2-14-17>



16. Lel Iu. I., Glebov I. A., Musikhina O. V., Ganiev R. S., Khardik N. V. Energy method of assessing and systematizing open pit automobile transport operating conditions. *Izvestiya Vuzov. Gornyi Zhurnal*. 2020;(8):14–25. (In Russ.). <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2020-8-14-25>

17. Kudrevatykh A. V., Furman A. S., Ashcheulov A. S., Ashcheulova A. S., Karnadud O. S. Methods for diagnosing the actual technical condition of the BELAZ wheel motor gearbox. *Bulletin KuzSTU*. 2021;(2):23–28. (In Russ.). <https://doi.org/10.26730/1999-4125-2021-2-23-28>

18. Kudrevatykh A. V., Ashcheulov A. S., Ashcheulova A. S. Procedure for determining the technical condition of motor-wheel gear of BELAZ dump trucks by oil parameters. *Bulletin KuzSTU*. 2020;(1):49–55. (In Russ.). <https://doi.org/10.26730/1999-4125-2020-1-49-55>

19. Burkov V. N., Burkova I. V., Zaskanov V. G. The network programming method in project scheduling problems. *Automation and Remote Control*. 2020;81:978–987. <https://doi.org/10.1134/S000511792006003X> (Orig. ver.: Burkov V. N., Burkova I. V., Zaskanov V. G. The network programming method in project scheduling problems. *Avtomatika i Telemekhanika*. 2020;(6):17–28. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0005231020060025>)

20. Gericke P. B., Gericke B. L. Creation of a unified diagnostic criterion for assessing the technical condition of mining equipment. *Journal of Mining Equipment and Electromechanics*. (In Russ.). 2021;(2):17–22. <https://doi.org/10.26730/1816-4528-2021-2-17-22>

### Информация об авторах

**Алексей Алексеевич Хорешок** – доктор технических наук, директор Горного института, профессор кафедры «Горные машины и комплексы», Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово, Российская Федерация; ORCID 0000-0002-3261-0933, Scopus ID 55886010500, ResearcherID E-6412-2014; e-mail haa.omit@kuzstu.ru

**Андрей Валерьевич Кудреватых** – кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Эксплуатация автомобилей», Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово, Российская Федерация; ORCID 0000-0002-1315-6843, Scopus ID 57209771510; e-mail kav.ea@kuzstu.ru

**Андрей Сергеевич Ащеулов** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Эксплуатация автомобилей», Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово, Российская Федерация; ORCID 0000-0002-3593-1636, Scopus ID 57209778323; e-mail ascheulovas@kuzstu.ru

**Андрей Викторович Винидиктов** – заведующий лабораторией кафедры «Эксплуатация автомобилей», Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово, Российская Федерация; Scopus ID 57218262831; e-mail: vinidiktivandrei@gmail.com

**Леонид Иванович Кантович** – доктор технических наук, профессор кафедры «Горное оборудование, транспорт и машиностроение», Национальный исследовательский технологический университет «Московский институт стали и сплавов» (НИТУ МИСиС), г. Москва, Российская Федерация; Scopus ID 57194038100; e-mail kantovich.li@misis.ru

### Information about the authors

**Aleksey A. Khoreshok** – Dr. Sci. (Eng.), Director of the Mining Institute, Professor of the Department of Mining Machines and Complexes, T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russian Federation; ORCID 0000-0002-3261-0933, Scopus ID 55886010500, ResearcherID E-6412-2014; e-mail haa.omit@kuzstu.ru

**Andrei V. Kudrevatykh** – Cand. Sci. (Eng.), Head of the Vehicle Operation Department, T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russian Federation; ORCID 0000-0002-1315-6843, Scopus ID 57209771510; e-mail kav.ea@kuzstu.ru

**Andrei S. Ashcheulov** – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Vehicle Operation Department, T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russian Federation; ORCID 0000-0002-3593-1636, Scopus ID 57209778323; e-mail ascheulovas@kuzstu.ru

**Andrey V. Vinidiktov** – Head of the Laboratory of the Department of Car Operation, T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russian Federation; Scopus ID 57218262831; e-mail: vinidiktivandrei@gmail.com

**Leonid I. Kantovich** – Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Mining Equipment, Transport and Mechanical Engineering, National University of Science and Technology “MISIS” (NUST “MISIS”), Moscow, Russian Federation; Scopus ID 57194038100; e-mail kantovich.li@misis.ru

Поступила в редакцию	29.09.2021	Received	29.09.2021
Поступила после рецензирования	11.11.2021	Revised	11.11.2021
Принята к публикации	01.12.2021	Accepted	01.12.2021