

eISSN 2500-0632



MINING SCIENCE AND TECHNOLOGY (RUSSIA)

TOM
VOL. 6, № 1
2021

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., 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, Novocherkassk, 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

EBSCO, DOAJ, РИНЦ, ВИНИТИ 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



This work is licensed under a
Creative Commons Attribution 4.0 License.



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 междисциплинарные направления, которые способствуют прогрессу в горном деле, например, технологическая и экологическая безопасность, организация и управление проектами в горной промышленности, развитие территорий, правовые аспекты использования природных ресурсов и другие направления, реализуемые исследователями и практиками. Журнал всегда открыт для развития нового. Статьи принимаются на английском или русском языках.

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

Дребенштетт 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-Российского государственного политехнического университета (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

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



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.



CONTENTS

EXPERIENCE OF MINING PROJECT IMPLEMENTATION

- Features of evaluating the economic security of peat industry enterprises
in the Tver Region of Russia (the industry review) 5
T. B. Yakonovskaya, A. I. Zhigulskaya

SAFETY IN MINING AND PROCESSING INDUSTRY AND ENVIRONMENTAL PROTECTION

- Impact of technogenic dust pollution from the closed mining enterprise
in the Amur Region on the ecosphere and human health 16
N. K. Rastanina, K. A. Kolobanov

MINING ROCK PROPERTIES. ROCK MECHANICS AND GEOPHYSICS

- Amplitude-dependent hysteresis of wave velocity in rocks in wide frequency range:
an experimental study 23
E. I. Mashinskii

- Determination of bench, dump and road sliding wedge technological parameters..... 31
I. K. Chunuev, Yu. M. Levkin, Zh. Bolotbekov

MINERAL RESOURCES EXPLOITATION

- Methods and technical solutions for keeping the path of a geotechnological borehole..... 42
D. N. Moldashi

CONSTRUCTION OF MINING ENTERPRISES AND UNDERGROUND SPACE DEVELOPMENT

- Typology of metro structures for the tasks of geotechnical risk classification 52
E. V. Potapova



СОДЕРЖАНИЕ

ОПЫТ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТОВ В ГОРНОПРОМЫШЛЕННОМ СЕКТОРЕ ЭКОНОМИКИ

- Особенности оценки экономической безопасности предприятий
торфодобывающей отрасли Тверского региона России (обзор отрасли) 5
Т. Б. Яконовская, А. И. Жигульская

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ В МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОМ КОМПЛЕКСЕ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

- Воздействие техногенного пылевого загрязнения на экосферу и здоровье человека
закрытого горного предприятия Приамурья 16
Н. К. Растанина, К. А. Колобанов

СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД. ГЕОМЕХАНИКА И ГЕОФИЗИКА

- Амплитудно-зависимый гистерезис скорости волны в горных породах
в широком диапазоне частот: экспериментальное исследование 23
Е. И. Машинский

- Определение технологических параметров призмы обрушения
уступов, отвалов и дорог 31
И. К. Чунуев, Ю. М. Левкин, Ж. Болотбеков

РАЗРАБОТКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

- Методы и технические решения повышения надежности удержания трассы
геотехнологической скважины 42
Д. Н. Молдаши

СТРОИТЕЛЬСТВО ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ И ОСВОЕНИЕ ПОДЗЕМНОГО ПРОСТРАНСТВА

- Типология сооружений метрополитена для задач классификации
геотехнических рисков 52
Е. В. Потапова



EXPERIENCE OF MINING PROJECT IMPLEMENTATION

Research article

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-1-5-15>**Features of evaluating the economic security of peat industry enterprises in the Tver Region of Russia (the industry review)**

T. B. Yakonovskaya , A. I. Zhigulskaya

Tver State Technical University, Tver, Russian Federation

tby81@yandex.ru**Abstract**

The paper is devoted to the urgent problem of sustainable and economically secure development of enterprises in the Tver Region peat-extracting sector of the economy. Despite the fact that peat deposits are widespread in many regions of Russia, the efficiency of their industrial and economic use is extremely low. The purpose of the study was to determine the features of the assessment and analysis of the economic security of an enterprise that develops peat deposits. The paper examines the relationship between the concepts of “peat rent” and “economic security”, and also provides the author’s interpretation of their content and essence. An analysis of the existing approaches to assessing the economic security of peat extracting enterprises was carried out, and the use of the rent approach was substantiated based on the data on the peat industry enterprises used in this study. The indicators for assessing the economic security of a peat production were identified. The authors proposed a methodological approach, a feature of which was comprehensive accounting of technical, economic, and natural factors that objectively affected the level of economic security of peat extracting enterprises. The proposed methodological approach also makes it possible to develop recommendations for increasing the flexibility and adaptability of peat extracting enterprises, taking into account the individual conditions of their work. The methodological research toolkit included the fundamentals of economic theory, information methods for processing statistical data, and economic and mathematical modeling. The methodology approbation was carried out through the example of enterprises of the Tver Region peat-extracting industry, which had been at a low ebb (in protracted economic crisis) for a long time. The conclusions, recommendations, and proposals of the study were used in the development of the Regional program “Natural Resources Management and Environmental Protection” for 2017–2022 (Order of the Tver Region Government No. 414-pp of December 26, 2016 as amended on February 7, 2020).

Key words

rent, peat industry, economic efficiency, economic security, regional economy, investment attractiveness, regional resources, peat extraction, process technology

For citation

Yakonovskaya T. B., Zhigulskaya A. I. Features of evaluating the economic security of peat industry enterprises in the Tver Region of Russia (the industry review). *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021;6(1):5–15. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-1-5-15>

ОПЫТ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТОВ В ГОРНОПРОМЫШЛЕННОМ СЕКТОРЕ ЭКОНОМИКИ

Научная статья

Особенности оценки экономической безопасности предприятий торфодобывающей отрасли Тверского региона России (обзор отрасли)

Т. Б. Яконовская , А. И. Жигульская

Тверской государственный технический университет, г. Тверь, Россия

tby81@yandex.ru**Аннотация**

Статья посвящена актуальной проблеме устойчивого и экономически безопасного развития предприятий торфодобывающего сектора экономики Тверского региона. Несмотря на то что торфяные месторождения широко представлены во многих регионах России, эффективность их промышленно-экономического использования крайне низкая. **Цель исследования** заключается в определении особенностей оценки и анализа экономической безопасности предприятия, разрабатывающего торфяные месторождения. В статье рассматривается связь понятий «торфяная рента» и «экономическая безопасность», а также приводится авторская трактовка их содержания. Проведен анализ существующих



подходов к оценке экономической безопасности деятельности добывающих предприятий и обосновано использование рентного подхода по материалам предприятий торфяной отрасли, используемым при проведении данного исследования. Выделен индикатор оценки экономической безопасности торфодобывающего производства. **Предложен методический подход**, особенностью которого является комплексный учет технико-экономических и природных факторов, объективно влияющих на уровень экономической безопасности торфодобывающих предприятий. Предложенный методический подход также позволяет разработать рекомендации для повышения гибкости и адаптивности торфодобывающих предприятий с учетом индивидуальных условий их работы. Методический инструментарий исследования включает положения экономической теории, информационные методы обработки статистических данных и экономико-математическое моделирование. **Апробация методики** проведена на примере предприятий торфодобывающего комплекса Тверского региона, которые довольно продолжительное время находятся в состоянии затянувшегося экономического кризиса. **Выводы, рекомендации и предложения** исследования использовались при разработке региональной программы «Управление природными ресурсами и охрана окружающей среды» на 2017–2022 годы (Постановление Правительства Тверской области от 26 декабря 2016 года № 414-пп с изменениями на 7 февраля 2020 г.).

Ключевые слова

рента, торфяная отрасль, экономическая эффективность, экономическая безопасность, региональная экономика, инвестиционная привлекательность, региональные ресурсы, отраслевой комплекс, добыча торфа, технология

Для цитирования

Yakonovskaya T. B., Zhigulskaya A. I. Features of evaluating the economic security of peat industry enterprises in the Tver Region of Russia (the industry review). *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021;6(1):5–15. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-1-5-15>

Introduction

Russia possesses the world's largest peat reserves, but they have been insufficiently surveyed and are poorly used in the national economy. The Tver Region is located in the central part of the Central Federal District of Russia. The Region mineral resource base is rather scarce in terms of the types of minerals and mostly represented by common natural resources, such as peat, sapropel, brown coal, sand (glass-making sand and mason sand), gravel and crushed stone, clay (low-melting clay and high-melting clay, bentonite clay), limestone (pure limestone, marmorized limestone, dolomitized limestone, siliceous limestone), marl, quartzite and quartz, mineral therapeutic muds and mineral waters. The explored mineral resource base of the Region includes about 3,738 deposits of minerals, but the Region industry has developed only 8% of them, while only 10 of the 15 known types of minerals are mined [1, 2]. The basis of the Tver Region economy is industry, whose enterprises bring up to 30% of the gross regional product. In 2019, the Region industrial enterprises shipped marketable products to the amount of 444 billion rubles (versus 442 billion rubles in 2018). However, in the gross regional product (GRP) structure, the share of the mining (extracting) sector is less than 1%. Such insignificant contribution to the regional economy evidences extremely ineffective use of the local mineral resource base that can lead to increasing the resource “dependence” (nonindependence) of the Tver Region sectors of industry.

Peat is an unique natural complex chemical product containing wide range of organic and inorganic chemical compounds, substances that are of great importance for many industries and areas of

economic use. In recent years, the global volume of peat production has decreased by about four times. The rates of decline in peat production in peat-extracting regions of Russia were especially high: the production dropped from 13.6 mln tons in 2000 to 2 mln tons in 2019). In conditions of economic instability, the regions attempt to turn the corner through the rational use of their own mineral resources [3, 4].

One of the priority areas in the regional program of the Tver Region “Natural Resources Management and Environmental Protection” for 2017–2022 is improving the efficiency of using local natural resource potential. But despite this, the Tver Region mining complex is poorly represented in the regional economy GRP pattern. The share of mining industry in the total gross regional product does not exceed three percent. Even the long-term target program of the Tver Region “Comprehensive program for improving energy efficiency of the regional economy and reducing energy costs in the public sector of the Tver Region for the period up to 2030”, assuming creation of conditions for the expansion of the use of renewable energy sources, secondary energy resources, and local fuels, did not provided real incentives for the development of peat enterprises. Despite the attempts of the Tver Region Government to revive the peat industry, the statistics show that the long economic crisis led to the bankruptcy of many peat extracting enterprises, while the economic security of the few operating peat producers became at risk. For instance, in the peat industry of the Tver Region, the share of closed down peat-extracting enterprises amounted to 90%. The most common reasons for their closing down were:



- the absence of clearly defined place of peat and peat deposits in the federal legislation of the country;
- the lack of intelligible economic policy in relation to peat enterprises regarding payments for the use of natural resources and land tax;
- tax arrears, especially on royalty, and debts on obligatory payments to other funds, rent arrears (to the regional budget);
- high degree of wear and tear of equipment and insignificant renewal of the equipment fleet with modern machines at the peat-extracting enterprises, as well as the absence of domestic machine building sector for peat extraction;
- outdated techniques for development of peat deposits that do not meet up-to-date technical and economic requirements, as well as strong dependence of the production process of peat extraction on weather conditions;
- the lack of specialized information technologies for design and management of peat production;
- low demand for peat products caused by the lack of strategic market research for penetrating into new markets and creating new markets, the lack of business planning and investment in the production;
- the peat enterprises face shortage of working capital;
- the lack of research on the interrelationships of production, technical, geological and natural factors with cost effectiveness indicators of the peat-extracting enterprises.

Many researchers are still discussing the issues of increasing cost effectiveness and investment attractiveness of the peat extracting sector, but clear solutions on such topical issues have not yet been developed. At the federal level, various models of management decisions have been proposed, including the creation of appropriate legislative framework. As a result, until today the Federal Law “On Peat” has not been adopted. Meanwhile, peat is quite widely represented in the the mineral resource base of all regions of Russia and belongs to the category of common, renewable resources with wide range of economic uses [5]. In addition, the peat-extracting and peat-processing sectors of the regional economy are the sphere of small and medium-sized businesses. In turn, the growth in the number of small and medium-sized businesses can rightfully be considered an an indicator of favorable investment climate, economic and resource security, as well as economic development of a region.

Research Methodology

In the practice of assessing the economic efficiency of the peat industry enterprises, an approach that is generally common for all mining enterprises is used, while the specifics of peat production are not

taken into account. Therefore, most of the methods for analyzing and assessing the economic efficiency of peat extracting enterprises produce inadequate results [6–10]. In addition, no overall assessment of the current economic condition of the peat industrial sector and its importance for regional economy is available. It should be noted that there are practically no attempts to assess the level of economic security and economic efficiency of the peat industry, while peat is the most widespread resource found in all regions of Russia, and its commercial development is carried out in 20 constituent entities of the Russian Federation. Unsustainable development of the peat industry enterprises leads to growing risks of losing economic security and instability in the development of the mining sector of the regional economy.

Modern economic literature can not offer unambiguous and clear methods for assessing the level of both economic efficiency and economic security of enterprises. There are quite a few methods for assessing the level of economic security, and they differ in the degree of complexity and laboriousness of calculations, as well as in the set of information data: methods of expert assessments, statistical methods, multi-criteria methods, comprehensive analysis of economic performance, a survey method, methods of “game theory”, etc. Each author offers his own methodology for identifying threats to sustainable development of enterprises. Some believe that economic security is a dynamic system of indicators, and the level of economic security should be assessed by the rate of change of these indicators over time (that is, based on relative values), this is a kind of economic potential for the development of an enterprise. Others propose a system of criteria and indicators (absolute values) of the economic performance, most often reducing the economic security assessment of an enterprise to determining the financial condition and crisis level. At the same time, it is believed that economic security reflects the production sustainable development and is closely connected with its economic efficiency. It should be noted that in the case of assessing the economic activity sustainability of peat extracting enterprises, it is necessary to know the optimal values (threshold values) of the parameters characterizing the economically efficient condition of an enterprise. And here a problem arises, because for peat industry, practically no studies on the economic efficiency parameters and the threshold value assessment are available.

Analysis of scientific views in the field of determining economic security allowed the authors to concretize this concept for peat industry: the economic security of peat industry is a sustainable development of the peat extracting enterprises of the sector. At the



same time, the peat extracting enterprises should demonstrate high adaptability and flexibility to internal and external threats to economic activities, be independent in matters of their development and have ability to defend against any types of threats. Fig. 1 presents a methodological scheme for diagnosing the economic security of peat extracting enterprises. To make anti-crisis decision on the selection and adjustment of business models and strategies for the development of a peat extracting enterprise, it is necessary to have clear understanding of the methodology for diagnosing economic security. In the proposed methodology, a comprehensive analysis of all elements of the economic security of an enterprise is carried out using the data of economic, financial, and production reporting of peat-extracting enterprises (see Fig. 1).

From the economic theory viewpoint, the concept of natural resource rent can be applied to increase the efficiency of the use of mineral resources. Strictly speaking, the value of natural resources is characterized by their ability to bring a profit [11].

In the peat industry, the factors and mechanism of rent generation remain poorly understood. In the author's interpretation, peat rent is a kind of natural mining rent, which is generated only in the peat-extracting industry and is relatively permanent due to

self-restoring ability of peat. The need for evaluating and separating peat rent from profit in current socio-economic conditions is determined by the very specificity of peat production, by the fact that there are no two identical peat deposits in nature, and therefore the profits of different peat-extracting enterprises will differ mainly due to differences in mining-and-geological and climatic operating conditions, as well as different levels of innovativeness of peat extraction methods [12–15].

Research Method and Data

The Tver Region occupies leading place in terms of peat reserves, it is here that 2,082 mln tons peat (about 50% of peat reserves of the Central Federal District of Russia) (in conversion to 40% moisture content) are located. For the Tver Region, the peat industry has long been the basis of the regional mining sector, but at present its role is insignificant (Table 1). Until 1990, the Region produced about 6 mln tons of peat annually. At present, the total annual production of all peat enterprises in Russia is 1.5 mln tons. Traditionally, the extracted peat was used as a standby fuel at regional thermal power plants, but with the transition to natural gas, the share of peat in the fuel balance dropped to about 1%. Another traditional field of using peat – the agro-industrial complex – demonstrate

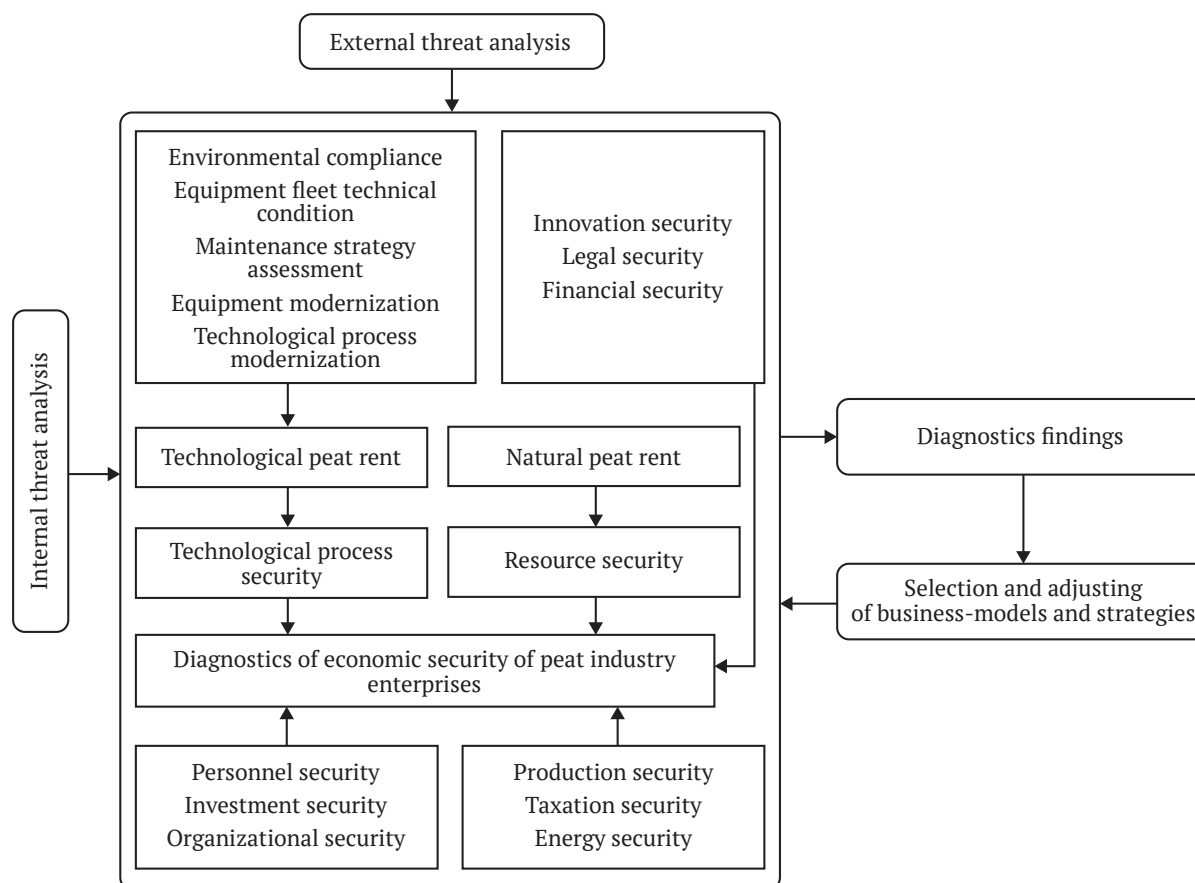


Fig. 1. Methodology for the analysis and assessment of economic security (compiled by the authors)



higher demand, but due to the weak solvency of the agricultural enterprises, the solvent demand for peat products is extremely weak [16–19].

As seen from Table 1, the peat-extracting sector products amount to less than 1% of the volume of shipped goods of the Tver Region mining sector of economy. Moreover, the highest share of unprofitable enterprises is also in the peat industry. The mining complex of the Tver Region is based on nonmetallic industries, which mainly extract resources for the building industry. As for the peat-extracting industry, already in 2016 up to 90% of its enterprises were at the stage of bankruptcy, and this, in turn, evidenced extremely unstable position of the whole peat industry sector. The rates of peat extraction by all enterprises of the Tver Region peat industry until 2017 were very low, no more than 100 ktpa (Table 2). Therefore, for supporting the peat industry in the region, a peat energy cluster has been organized since 2011, headed by the Bioenergy Corporation.

As seen from Table 2, the volume of mineral resource production by the Tver Region mining sector dropped in 2013, and only by 2019 it reached 50% of the 2012 level. At the same time, the production of fuel and energy resources, represented by peat resources, dropped sharply after 2014 and completely terminated in 2017. However, it should be noted here that, despite the termination of the peat extraction for fuel purposes, the extraction of peat for agro-industrial needs grew, albeit at a slow pace. In the Tver Region, the bulk of peat reserves (more than 60%) belongs high-moor deposits, 28% are lowland type deposits, and 11% are of transitional and mixed types. Peat deposits are diverse in terms of area size, type, thickness and structure. The variety of peat in

terms of geological composition and physicochemical properties makes it possible to use the category of “peat rent” as an indicator of the efficiency of business activity of peat extracting enterprises, which allows assessing the peat producer economic security [20–24]. To assess economic security of the peat extracting enterprises, the following methodology was developed (Fig. 1):

1. All technical, economic, production and financial information was applied to the elements of economic security (Table 3).

2. For each element, a set of basic indicators was determined (Table 4), and the threshold values were determined as the average values for all peat enterprises in the Tver Region.

3. Based on Table 5 data, the indicators were calculated for certain levels of economic security.

4. The following points were assigned by the method of expert assessments: 0 points – stable, 6 points – threshold, 12 points – critical, 18 points – crisis. The levels of economic security of a peat extracting enterprise: stable (*S*), threshold (*T*), critical (*C*), crisis (*CR*). The economic security index of a peat enterprise (ES_{pe}) was determined as an average value by formula:

$$ES_{pe} = \frac{\sum X_i}{\sum N_i} \quad (1)$$

where $\sum X_i$ – scores of the parameters from Table 4; $\sum N_i$ is the number of the parameters from Table 5. Ranks of the economic security level were determined by the authors after calculating the index of economic security: stable (from 0 to 6 points); threshold (from 6 to 12 points); critical (from 12 to 18 points); crisis (over 18 points).

Table 1

Mining sector of the Tver Region in 2016

Indicator	Raw materials for cement industry	Peat industry	Sand and gravel mix extraction	Clay extraction	Total
Volume of shipped products, bln rubles	499	0,5	362	241	1,102.5
Average number of employees, persons	350	100	200	230	880
Average monthly wage, rubles	33,500	12,300	26,293	29,120	21,803
Share of unprofitable enterprises, %	1	90	2	1	–

Source: compiled by the authors based on the data of the Tver Region office of the Federal State Statistics Service <https://tverstat.gks.ru/>

Table 2

Dynamics of the Tver Region mining sector production volume and the data on the peat industry production for fuel and energy and agricultural needs, mln rubles

Peat extracting sector products	Year							
	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Commercial products of the mining sector	2,216	1,896	1,517	788	726	774	877	1,102
Extraction of fuel and energy resources	590	613	287	0,4	1,4	–	–	–
Extraction of peat for agriculture	2.3	1.7	1.4	1.55	1.6	1.68	1.7	1.75

Source: compiled by the authors based on the data of the Tver Region office of the Federal State Statistics Service <https://tverstat.gks.ru/>



Table 3

Characteristics of a peat extracting enterprise economic security elements (fragment)

Element	Characteristics
Technological process security	Compliance of the process equipment fleet structure with the requirements of modern peat extraction processes, environmental protection and enterprise strategy
Resource security	Proven provision with the required volumes of peat reserves of proper geological quality, effective use of favorable conditions of the peat extracting season
Financial security	Optimal and sufficient equity to debt ratio
Investment availability security	Compliance of the level of business activity with the selected development strategy
Taxation security	Fluctuations in the MET rate for peat, lease and environmental payments, compliance of the tax regime with the selected business strategy
Personnel security	Provision with skilled personnel
Innovation security	Availability of titles of protection (patents, copyright certificates, etc.). Share of innovative products in the product mix
...	...

Source: compiled by the authors.

Table 4

Threshold score of the key indicators of a peat enterprise economic security (fragment)

No.	Indicator	S	T	C	CR
1	Wear (W) rate, %	$W \leq 50$	$50 < W \leq 70$	$70 < W \leq 90$	$W > 90$
	Machinery readiness (MR) level, %	$MR \geq 100$	$100 < MR \leq 80$	$80 < MR \leq 60$	$MR < 60$
	Share of technological rent (R_t), %	$R_t \geq 15$	$10 < R_t \leq 15$	$5 < R_t \leq 10$	$R_t \leq 5$
	Return on assets (ROA)	$ROA \geq 2$	$1.5 \leq ROA < 2$	$1 \leq ROA < 1.5$	$ROA < 1$
	Cost growth (CG) rate, %	$CG \leq 100$	$100 < CG \leq 200$	$200 < CG \leq 300$	$CG > 300$
2	Share of rent due to peat quality R_{pq} , %	$R_{pq} \leq 30$	$20 < R_{pq} \leq 30$	$10 < R_{pq} \leq 20$	$R_{pq} \leq 10$
	The rate of increase in production volumes (PV), %	$PV \geq 100$	$90 < PV \leq 100$	$80 < PV \leq 90$	$PV \leq 70$
	Provision with reserves (PR), %	$O \geq 100$	$100 < O \leq 80$	$80 < O \leq 50$	$O < 50$
3	Liquidity level (L)	$L \leq 1.5$	$1 < L \leq 1.5$	$1.3 < L \leq 1.5$	$L < 1$
	Solvency level (Solv)	$Solv \geq 0.5$	$0.4 < Solv \leq 0.5$	$0.3 < Solv \leq 0.4$	$Solv < 0.3$
	Return on sales (ROS), %	$ROS \geq 15$	$10 \leq ROS < 15$	$5 \leq ROS < 10$	$ROS < 5$
	Enterprise profitability (EP), %	$EP \geq 20$	$15 \leq EP < 20$	$10 \leq EP < 15$	$EP < 10$
4	Production investment growth rate (PI), %	$PI \geq 100$	$80 \leq PI < 100$	$60 \leq PI < 80$	$PI < 60$
	Investment level (IL), %	$IL > 0.3$	$0.3 \leq IL < 0.2$	$0.2 \leq IL < 0.1$	$IL < 0.1$
	Business activity level (BA), %	$BA \geq 0.6$	$0.6 \leq BA < 0.4$	$0.4 \leq BA < 0.2$	$BA < 0.2$
	Production facility modernization level (PFM), %	$PFM > 100$	$70 < PFM \leq 100$	$50 < PFM \leq 70$	$PFM < 50$
5	Peat MET growth rate (MET), %	$MET \leq 1$	$1 < MET \leq 3$	$2 < MET \leq 4$	$MET > 4$
	lease rate growth rate (LRG), %	$LRG \leq 5$	$5 < LRG \leq 10$	$10 < LRG \leq 15$	$LRG > 15$
	Refinancing rate (Refin), %	$Refin \leq 8$	$8 < Refin \leq 10$	$10 < Refin \leq 12$	$Refin > 12$
6	Personnel turnover rate (PT), %	$PT \leq 7$	$7 < PT \leq 10$	$10 < PT \leq 13$	$PT > 13$
	Average wage growth rate salaries at the enterprise (WGR), %	$WGR \leq 110$	$100 \leq WGR < 110$	$90 \leq WGR < 100$	$WGR < 90$
	Worker productivity (WP) growth rate, %	$WP \geq 60$	$60 < WP \leq 40$	$40 < WP \leq 20$	$WP < 20$
	Ratio of the average wage at the enterprise to that in the Tver Region industry (WR), times	$WR \geq 0.6$	$0.4 \leq WR < 0.6$	$0.2 \leq WR < 0.4$	$WR < 0.2$
7	Innovative product volume growth rates (IPG), %	$IPG \geq 60$	$40 < IPG \leq 60$	$40 < IPG \leq 20$	$IPG < 20$
	Share of innovative products in the product mix (IPS), %	$IPS \geq 50$	$50 < IPS \leq 30$	$30 < IPS \leq 10$	$IPS < 10$
...	...	...	...	...	...

Source: compiled by the authors based on the Tver Region peat producing enterprises reporting data



Table 5

Effect of peat rent on the indicators of economic activity of the Tver Region peat extracting enterprises

Indicator	“Peat Company”	“Diakar”	“TEK Tver-regiontorf”	“Tverskaya fuel and energy company”
Share of peat rent in profit, %	40	23	15	10
The ratio of the peat rent portions (of I and II kinds), %	28/12	15/8	6/9	4/6
The share of the factor effect on the prime cost, %:				
– factor of geological quality of peat;	35	31	33	35
– factor of weather conditions of the peat extracting season	15	15	15	15
The share of the effect of the used equipment level on the prime cost, %	40	38	34	30
The share of the effect of the used process (method) level on the prime cost, %	8	8	8	8
Equity to debt ratio, %	60/40	57/43	47/53	38/62

Source: calculated by the authors based on the Tver Region peat producing enterprises reporting data

A feature of the methodology for assessing economic security is the use of peat rent as the main indicator of technological, resource, financial and taxation elements of the security of production and economic activities of a peat extracting enterprise. For example, Figs. 2, 3 demonstrate the relationship between the peat rent and the indicators of economic security of a peat enterprise, given in Table 4. Studies of some indicators of economic security shown in Figs. 2, 3, showed that the prime cost of peat extraction was 20% higher for high-moor peat relative to lowland peat, whereas the productivity of lowland peat deposits was 15% higher than that of high-moor peat deposits. This difference in the indicators is due to the difference in the resource (peat) quality factor (geological quality, deposit configuration, weather conditions of the production season, etc.). The values of economic security of peat enterprises using the same process technology and

equipment, but developing peat deposits of different geological quality and natural conditions, differ by the amount of the rent component of income [1–3].

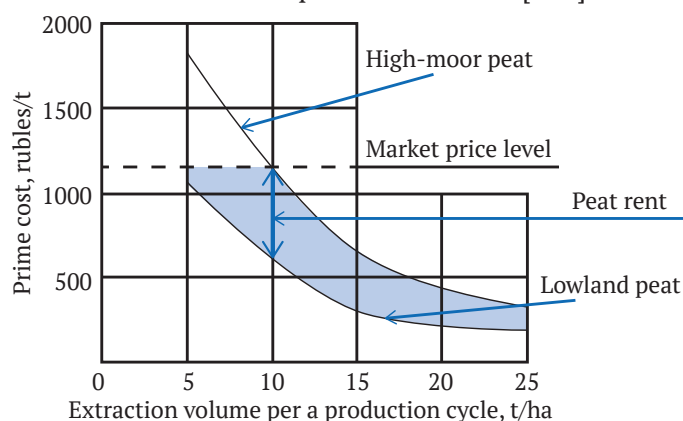


Fig. 2. Peat rent, prime cost of milled peat, cyclic collection (compiled by the authors)

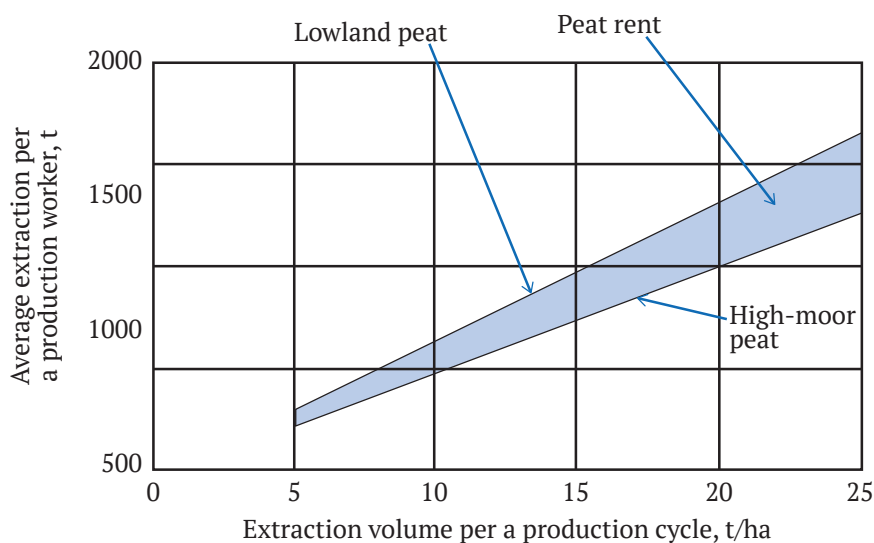


Fig. 3. Peat rent, average annual output of a worker, cyclic collection (compiled by the authors)



Findings

The peat extracting industry in the Tver Region in 2019 was represented by 4 enterprises, which develop altogether 6 peat deposits (4 of lowland peat type and 2 of high-moor peat type). Despite the fact that the Tver Region has the largest reserves of peat in the Central Federal District of the Russian Federation, estimated at 2.08 billion tons (on conversion to 40% moisture content), the rate of extraction of the peat was and remains very low, no more than 100 ktpa, and the results of the economic activities of these enterprises in 2019 did not allow overcoming the crisis of the peat industry in the Region.

As shown in Fig. 4, two out of these four peat enterprises in 2019 suffered losses from the economic activities, and this took place at the same economic, technological, weather conditions and taxation regimes. But one should take into account the fact that from 50 to 70% of peat reserves of “TEK Tverregiontorf”, “Diakar” and “Peat Company” belong to the lowland types of peat deposits. The features of the effect of peat rent on the indicators of economic activity are presented in Table 5 (based on the authors’ research).

The data of Table 5 show that, despite the same peat extraction method and weather conditions in the 2019 production season, the indicators of economic performance are very different. The amounts and ratio of the rent incomes in peat extracting either increase profit or reduce losses. However, the peat rent indicator is strongly dependent on the deposit development (life cycle) stage. For instance, for the “Tverskaya fuel and energy company”, the peat rent share is the smallest, 10% of the profit, because peat is mined at the stage

of “declining production”, when the deposit begins to deplete and the reserves have been worked out by 67%. The results of the economic security score calculations using the method are given in Table 6.

Table 6

Economic security of peat enterprises

Company	Year		
	2017	2018	2019
“Peat Company”	5.2	8.4	10.2
“Diakar”	9.6	12.4	14.7
“TEK Tver-regiontorf”	10.5	15.2	19.1
“Tverskaya fuel and energy company”	16.2	20.3	25.5

Source: calculated by the authors based on the Tver Region peat producing enterprises reporting data

Analysis of the data given in Table 6 showed that the economic security of all these four peat enterprises was deteriorated by 2019. The “Peat Company” is in relatively security, but it should be noted that this enterprise has the highest quality resource base with predominance of lowland type peat. The performed economic security diagnostics made it possible to determine the main problems of the crisis conditions at the peat-extracting enterprises in the Tver Region (Table 7).

Not feeling the real support of the regional authorities, the peat extracting enterprises are developing an anti-crisis development strategy and, as the primary anti-crisis measures, use a simplified taxation system and are registered as micro-enterprises. These measures allow to reduce the tax burden, but they are clearly not enough to mitigate the threats to economic security. The statistical data for the region mining sector are also ambiguous.

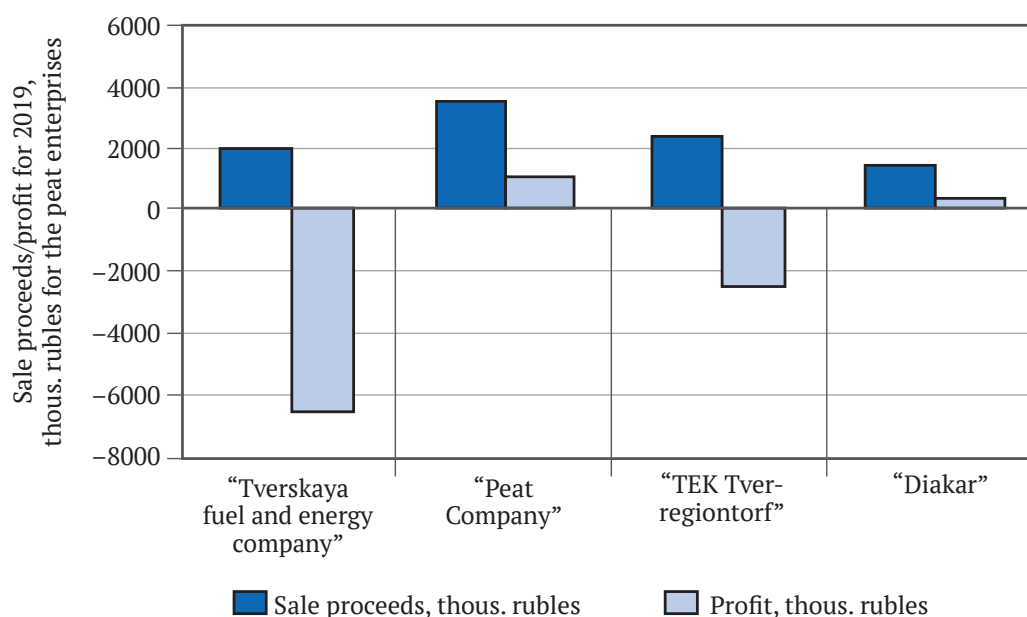


Fig. 4. Sale proceeds and profit of peat extracting enterprises of the Tver Region for 2019 (compiled by the authors)



For instance, until 2016, the extraction of fuel and energy resources (fuel peat) was carried out in the Tver Region, but since 2017 there are no data on the region peat extracting enterprises, while there are no data on the share of unprofitable enterprises in this sector of economic activity. Although the archives of the Tver Region Arbitration Court contain a sufficient number of bankruptcy cases of the peat extracting enterprises.

Table 7

Problems of economic security of peat enterprises

Company	Economic security problems
“Peat Company”	1. Decrease in volume of peat extraction; 2. Lack of free funds; 3. Suboptimal structure of the process equipment fleet; 4. Peat product sales problems
“Diakar”	1. Average wear and tear of equipment; 2. Decrease in volume of peat extraction; 3. Lack of free funds; 4. Decreased liquidity; 5. Peat product sales problems
“TEK Tver-regionortf” [22–25]	1. Large percentage of equipment wear; 2. Suboptimal structure of the process equipment fleet; 3. Decrease in volume of peat extraction; 4. Lack of free funds; 5. Liquidity loss 6. Peat product sales problems; 7. Poor quality of resource base
“Tverskaya fuel and energy company”	1. Large percentage of equipment wear; 2. Decrease in volume of peat extraction; 3. Lack of free funds; 4. Suboptimal structure of the process equipment fleet; 5. Liquidity loss 6. Peat product sales problems; 7. Depletion of resource base

Source: compiled by the authors.

Conclusion

Since the diagnostics and assessment of the economic security of the peat industry enterprises in the Tver Region made it possible to assert that all the peat extracting enterprises faced practically the same set of problems, the following program of anti-crisis measures could be proposed to mitigate the risks of losing economic security:

1. To improve technological process safety:
 - improving the quality of the process equipment through the equipment modernization;
 - control of the timely implementation and quality of service maintenance of the equipment;
 - improvement of the used peat extraction methods or individual operations of the process cycle;
 - optimization of the peat extracting equipment fleet structure;
 - implementation of the processes for deep and complex processing of raw peat;
 - introduction of new approaches to planning “full cycle” peat extraction and processing processes;
 - use of automated and information technologies for business process management;
2. To improve financial security:
 - optimization of taxation regimes and tax payments;
 - increasing production efficiency;
 - optimization of production costs, control of the costs of peat extraction;
 - introduction of information technologies for the analysis of the economic and financial conditions of peat enterprises;
3. To improve personnel security:
 - optimization of staffing structure;
 - improvement of labor remuneration systems;
 - stimulation of productivity growth and labor quality;
4. To improve investment security:
 - monitoring of investment projects for compliance with the adopted strategy for peat production development;
 - systematic implementation of a comprehensive marketing analysis of the markets for peat products and peat extracting equipment;
 - monitoring of equity to debt ratio of peat producing enterprises.

The authors' approach to the diagnostics and assessment of the peat industry enterprises economic security allows to completely rethink the existing design methods for peat extracting enterprises and develop recommendations for increasing the flexibility and adaptability of peat extracting enterprises, taking into account the individual conditions of their operation.

References

1. Mikhailov A., Zhigulskaya A., Yakonovskaya T. Strip mining of peat deposit. In: Behzad Ghodrati, Uday Kumar, Håkan Schunnesson (eds). *Mine Planning and Equipment Selection: MPES 2017 Proceeding of the 26th International Symposium. 29–31 August 2017*. Luleå: Luleå University of Technology; 2017, pp. 497–501.
2. Yakonovskaya T. B., Zhigulskaya A. I., Zhigulsky M. A. Analysis of investment and innovation activity in peat industry. In: *Current state of economic systems: economics and management. Proceedings of International Scientific Conference, 4–5 December 2018*. Tver: SKF office, 2018, pp. 148–153. (In Russ.).



3. Akimova T. A. *Fundamentals of Sustainable Development Economics*. Moscow: Ekonomika; 2013. 332 p. (In Russ.).
4. Mikheeva N. N. *Regional Economics and Management*. Khabarovsk: RIOTYPE; 2000. 400 p. (In Russ.).
5. Yakonovskaya T. B., Zhigulskaya A. I., Zuzin B. F. Features of estimation of economic efficiency of technologies of development of peat deposit. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2014;(7):318–323. (In Russ.)
6. Gayfullina M. M., Kostomarov E. V. Methodical approach to assessment of the economic safety of the oil company. *Naukovedenie*. 2017;9(2). URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/64EVN217.pdf> (Accessed: 08.07.2020). (In Russ.).
7. Pluzhnikov V. G., Kukharensko S. I., Shikina S. A. Diagnosis as a tool of providing economic security of enterprises. *Bulletin of the South Ural State University. Series "Economics and Management"*. 2017;11(1):36–44. (In Russ.). <https://doi.org/10.14529/em170105>
8. Tokar E. V., Serdyuk L. E. Diagnostics as a tool for ensuring the economic security of an enterprise. *Modern economics: topical issues, achievements, and innovations. Proceedings of XI Scientific-Practical Conference*. (November 25, 2017): in 2 Parts. Penza: Nauka i Prosveshchenie Publ.; 2017. Part 1, pp. 19–31 (In Russ.).
9. Vyborova E.N. Methodological features of comparative diagnostics of the economic status of business entities. *Ekonomicheskii analiz: teoriia i praktika*. 2007;24(105):15–19. (In Russ.).
10. Vinokurov E. *Introduction to the Eurasian Economic Union*. London; New York: Palgrave Macmillan; 2018. 211 p.
11. Tsvetkov P., Strizhenok A. Ecological and economic efficiency of peat fast pyrolysis projects as an alternative source of raw energy resources. *Journal of Ecological Engineering*. 2016;17(1):56–62. <https://doi.org/10.12911/22998993/61190>
12. Bogdanov V. D., Ilysheva N. N., Baldescu E. V., Zakirov U. Sh The development of correlation model between economic development and environmental performance on the basis of non-financial reporting. *Economy of Region*. 2016;12(1):93–104. (In Russ.). <https://doi.org/10.17059/2016-1-7>
13. Anderson T. W., Sclove S. L. *Introductory Statistical Analysis*. Boston: Houghton Mifflin Company; 1974. 82 p.
14. Aldieri L., Vinci C.P., Kotsemir M. The role of environmental innovation through the technological proximity in the implementation of the sustainable development. *Business strategy and the environment*. 2019;28(5):356–366. <https://doi.org/10.1002/bse.2382>
15. Clarke D., Rieley J. *Strategy for responsible peatland management*. Amsterdam; 2012. URL: <http://www.bordnamona.ie/wp-content/uploads/2012/07/Strategy-for-Responsible-Peatland-Management.pdf> (Accessed: 08.07.2020).
16. Wright M.M., Satrio J.A., Brown R.C., Daugaard D.E., Hsu D.D. 2010. *Techno-economic analysis of biomass pyrolysis to transportation fuels*. National Renewable Energy Laboratory. Technical NREL/TP-6A20-46586, November 2010. URL: <https://www.nrel.gov/docs/fy11osti/46586.pdf> (Accessed: 08.07.2020).
17. Sachs J. D., Warner A. M. *Natural Resource Abundance and Economic Growth*. National Bureau of Economic Research. Cambridge: MA. NBER Working; 1995. 98 p.
18. Bendikov M. A. Economic security of an industrial enterprise in conditions of economic downfall. *Menedzhment v Rossii i za rubezhom*. 2000;(2):19–29. (In Russ.).
19. Ndubisi N. O., Al-Shuridah O. Organizational mindfulness, mindful organizing, and environmental and resource sustainability. *Business strategy and the environment*. 2019;28(3):436–446. <https://doi.org/10.1002/bse.2219>
20. Akberdina V. V., Grebyonkin A. V., Smirnova O. P. Comprehensive assessment of industries economic security: regional aspect. *Economy of Region*. 2017;13(4):1264–1279. (In Russ.). <https://doi.org/10.17059/2017-4-23>
21. Kozulin A., Tanovitskaya N., Minchenko N. Developing a national strategy for the conservation and sustainable use of peatlands in the Republic of Belarus. *Mires and Peat*. 2018;21(5):1–17. <https://doi.org/10.19189/MaP.2016.OMB.227>
22. Muller F. Strategies for peatland conservation in France – a review of progress. *Mires and Peat*. 2018;21(6):1–13. <https://doi.org/10.19189/MaP.2016.OMB.218>



23. Gerding M. A. W., Karel E. H. K., de Vries G. E. The history of the peat manufacturing industry in The Netherlands: Peat moss litter and active carbon. *Mires and Peat*. 2015;16(10):1–10. URL: http://www.mires-and-peat.net/media/map16/map_16_10.pdf (Accessed: 08.07.2020).

24. Tsvetkov P. S. The history, present status and future prospects of the Russian fuel peat industry. *Mires and Peat*. 2017;19(14):1–12. <https://doi.org/10.19189/MaP.2016.OMB.256>

Information about the authors

Tatiana B. Yakonovskaya – Cand. Sci. (Economics), Assoc. Prof., Department of Economics and Production Management, Tver State Technical University, Tver, Russian Federation; ORCID: [000-0003-0604-0129](https://orcid.org/000-0003-0604-0129); SCOPUS ID: [57196258982](https://orcid.org/57196258982); e-mail: tby81@yandex.ru

Alexandra I. Zhigulskaya – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Department of Technological Machines and Equipment, Tver State Technical University, Tver, Russian Federation; ORCID: [0000-0003-4350-7314](https://orcid.org/0000-0003-4350-7314); SCOPUS ID: [57196259021](https://orcid.org/57196259021); e-mail: 9051963@mail.com.

Received 17.09.2020

Revised 16.11.2020

Accepted 29.01.2021



SAFETY IN MINING AND PROCESSING INDUSTRY AND ENVIRONMENTAL PROTECTION

Research article

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-1-16-22>**Impact of technogenic dust pollution from the closed mining enterprise in the Amur Region on the ecosphere and human health**

N. K. Rastanina , K. A. Kolobanov

Pacific State University, Khabarovsk, Russian Federation n.rastanina@yandex.ru**Abstract**

Environmental protection is a complex ecological and economic problem, including the need to develop and implement a number of environmental protection measures to mitigate the negative impact of mining waste on all natural environment components and human health. In this regard, the study purpose was to assess the impact of Pb, Cd, Cr, and As compounds on the environment and health of the population of the Solnechny miner's village. Based on the purpose, the following tasks were set: 1) review and systematization of literature data on the problem of technogenic dust pollution; 2) assessment of the mining industrial system as a source of ecosystem pollution with toxic elements within the closed mining enterprises impact areas; 3) development of proposals for mitigating the impact of mining activities on ecosystems and human health. The paper presents the findings of the study of the elemental status of children and adolescents living within the closed town-forming enterprise JSC Solnechny GOK impact area. The relationship between the level of technogenic pollution of the natural environment and the changes in the elemental status of the children was shown. A feature of the elemental status of the children in the study group was high content of heavy metals, including Pb, Cr, and As. Our research confirmed the data that a growing child's body actively adsorbs compounds of toxic chemical elements. Deficiency and imbalance of microelements in the body can cause ecologically-related diseases in the child population. Individual and population carcinogenic risks (CR) caused by the As, Pb, and Cr pollution were calculated. In accordance with the acceptance criteria for the risk caused by exposure to the pollutants, the individual carcinogenic risk $CR(Cr) = 1,05 \cdot 10^{-3}$ belongs to the fourth range and is unacceptable neither for the population, nor for occupational groups. This is De manifestis risk, and when it is reached, it is necessary to carry out emergency curative measures to mitigate it. The individual risks $CR(As) = 7,05 \cdot 10^{-4}$ also exceed the acceptable level for the population. This level of pollution is subject to permanent monitoring, requires development and implementation of planned curative measures to improve the indicators of the human environment, one of which is the organization of the environmental monitoring system in the study area.

Key words

mining, environmental monitoring, waste, heavy metal, compounds, population risk, Amur Region

For citation

Rastanina N. K., Kolobanov K. A. Impact of technogenic dust pollution from the closed mining enterprise in the Amur Region on the ecosphere and human health. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021;6(1):16–22. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-1-16-22>

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ В МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОМ КОМПЛЕКСЕ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Научная статья

Воздействие техногенного пылевого загрязнения на экосферу и здоровье человека закрытого горного предприятия Приамурья

Н. К. Растанина , К. А. Колобанов

Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск, Россия n.rastanina@yandex.ru**Аннотация**

Проблема защиты окружающей среды представляет собой сложную эколого-экономическую задачу, включающую необходимость разработки и реализации ряда природоохранных мероприятий,



обеспечивающих минимизацию негативного влияния отходов горного производства на все природные составляющие и здоровье человека. В связи с этим целью исследования является оценка влияния соединений Pb, Cd, Cr и As на окружающую среду и здоровье населения горняцкого поселка Солнечный. Исходя из цели определены следующие задачи: 1) анализ и систематизация литературных данных по проблеме техногенного пылевого загрязнения; 2) оценка горнопромышленной техногенной системы как источника загрязнения экосистем токсичными элементами в границах влияния закрытых горнорудных предприятий; 3) разработка предложений по снижению влияния горного техногенеза на состояние экосистемы и здоровье человека. В статье изложены результаты исследований по изучению элементного статуса детей и подростков, проживающих в границах влияния закрытого градообразующего предприятия ОАО «Солнечный ГОК». Показана связь изменений в элементном статусе детей с уровнем техногенного загрязнения среды обитания. Особенностью элементного статуса детей в исследуемой группе является высокий показатель содержания тяжелых металлов, в том числе Pb, Cr и мышьяка. Наши исследования подтверждают данные о том, что детский растущий организм активно адсорбирует соединения токсичных химических элементов. Рассчитаны индивидуальные и популяционные канцерогенные риски по As, Pb, Cr. В соответствии с критериями приемлемости риска, обусловленного воздействием загрязняющих веществ, индивидуальный канцерогенный риск $CR (Cr) = 1,05 \cdot 10^{-3}$ относится к четвертому диапазону и является неприемлемым ни для населения, ни для профессиональных групп. Это De manifestis Risk, и при его достижении необходимо проведение экстренных оздоровительных мероприятий по его снижению. Индивидуальный риск $CR (As) = 7,05 \cdot 10^{-4}$ превышает приемлемое значение для населения. Данный уровень загрязнения подлежит постоянному контролю, требует разработки и проведения плановых оздоровительных мероприятий по улучшению показателей среды обитания, одним из которых является организация системы экологического мониторинга в исследуемом районе.

Ключевые слова

горное дело, экологический мониторинг, отходы, тяжелые металлы, популяционный риск, Приамурье

Для цитирования

Rastanina N. K., Kolobanov K. A. Impact of technogenic dust pollution from the closed mining enterprise in the Amur Region on the ecosphere and human health. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021;6(1):16–22. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-1-16-22>

Introduction

Long-term research experience of Russian and foreign scientists testifies to the negative impact of mining and processing complexes, both operating and closed [1–4], on the natural environment and humans. Environmental pollution by heavy metal compounds (Cr, Cd, Pb and As) in mining areas, where mining and agriculture coexist, is a major worldwide concern [5–16]. The studies of foreign scientists in South Africa, Mexico, and China have shown high levels of soil, crops and microbial communities pollution with metals [5–9]. Xu Zhang et al., having analyzed the features of migration of Fe, Mn, Cr, Pb, emphasized high contents of these elements in soils and plants, noting their high phytotoxicity and significant deterioration of water quality due the pollution. Bioavailable forms of heavy metals pose great environmental risks, ultimately threatening human health [8]. Karaca O. et al. note that heavy metal pollution can affect biodiversity and economic well-being of the study region [6]. Ying-NanHuang et al. note that children are more sensitive than adults to the impacts of metals Cd and Cr, as reflected in the HI and CR values, exceeding the permissible levels [5, 9].

Recently, in the Far Eastern Federal District (FEFD), including in the Amur region, mining enterprises, including tin ore producing ones, have been closed, which has led to serious environmental problems. For instance, Solnechny Mining and Processing Complex (hereinafter Solnechny GOK or the GOK), closed to date, for many years was one of the largest mining enterprises in the Far East. The tin ore deposit in the central part of the Khabarovsk Territory was exploited by the GOK for decades, starting from the middle of the past century. After the mining termination and the mining enterprise closure, the past mining activity negative impact on the natural environment and the surrounding area can continue for a long time.

The main types of such impacts include disfigurement of the landscape and deterioration of soil and vegetation cover, changes in the condition and composition of groundwater and surface water, decrease in biodiversity, and the release of hazardous substances onto the day surface.

Currently, there is a need to organize a comprehensive environmental monitoring of ecosystem changes, as well as to predict environmental impact of technogenic objects for development of measures



aimed at reducing the negative consequences caused by long-term mining activities and eliminating the cumulative harm to natural environment (waste of mineral processing) in the tin ore mining areas of the Far East, including in the Amur region. In this regard, the study purpose was to assess the impact of Pb, Cd, Cr and As compounds on the natural environment and health of the population of the Solnechny miner's village for ensuring environmental safety. Proceeding from this purpose, the following tasks were defined: 1) review and systematization of literature data on the problem of technogenic dust pollution; 2) assessment of the mining industrial system as a source of the ecosystem pollution with compounds of toxic elements within the closed mining enterprises impact areas; 3) development of proposals to reduce the impact of mining activities/consequences on the ecosystem and human health.

Research Subject and Methods

The study subjects were natural and technogenic ecosystems formed in the past century due to the activities of the Solnechny Mining and Processing Complex. The tin ore processing waste is a potential source of the technogenic pollution. For quantitative analysis of the samples (the tin ore processing waste, soils, vegetation, biological material), the ICP/AAS (inductively coupled argon plasma atomic absorption spectroscopy) method was used.

A mass spectrometer (ICP-MS Elan 9000, Canada) was used for measuring the quantitative contents of heavy metals and arsenic compounds [17]. According to the Guidelines for assessing the risk to public health when exposed to natural environment polluting chemicals [18], to determine the values of population carcinogenic risks (PCR), reflecting the additional number of cases of malignant neoplasms that can arise throughout life due to exposure to the factor under study, the calculation is performed using formula:

$$PCR = CR \cdot POP, \quad (1)$$

where CR – is an individual carcinogenic risk, POP – is the study population number, people.

The calculation of the additional probability of developing cancer in an individual throughout his life (CR) was carried out by formula:

$$CR = LADD \cdot SF, \quad (2)$$

where $LADD$ is lifetime average daily dose of an element, $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{day})$; SF is carcinogenic potential factor, $(\text{kg} \cdot \text{day})/\text{mg}$.

Lifetime average daily dose of an element intake into a human body is calculated by formula:

$$LADD = \frac{((Ca \cdot Tout \cdot Vout) + (Ch \cdot Tin \cdot Vin)) \cdot EF \cdot ED}{BW \cdot AT \cdot 365}, \quad (3)$$

where Ca – is a substance concentration in the atmospheric air, mg/m^3 ; $Tout$ – is time spent outdoors, h/day ; $Vout$ – is outdoor breathing rate, m^3/h ; Ch – is a substance concentration in the room air, mg/m^3 ; Tin – is time spent indoors, h/day ; Vin – is indoor breathing rate, m^3/h ; EF – is exposure frequency, days/year ; ED – is exposure duration, years; BW – is a human body weight, kg ; AT – is exposure averaging period, years.

Findings and Discussion

The specificity of the extraction and processing of tin ore at the mining enterprise under study consisted in the extraction and processing of huge volume of rock mass, of which only a small part was used, whereas the rest was accumulated in the form of technogenic waste, so-called tailings, placed in the special structure, tailings storage facility (TSF). This hydraulic engineering facility was designed and put into operation in 1969. In the process of ore mining and processing, new technogenic landforms not characteristic of this territory were formed. During the GOK operation, the TSF has accumulated about 16 million m^3 of waste [1]. In 2001, in connection with the enterprise operation termination, the TSF of the central processing plant of Solnechny GOK was drained, but its surface, contrary to the legislation of the Russian Federation (according to which the subsoil user was obliged to conserve the man-made object and reclaim the disturbed lands), was not reclaimed in a timely manner.

Migration of chemical elements and their compounds as a result of complex physicochemical processes of transformation of minerals contained in waste, occurring in the near-surface part of the lithosphere under conditions of increased aeration is one of the main causes of ecosphere pollution. At present, the TSF of the closed Solnechny GOK is a great source of dust release and intensive technogenic environmental pollution with toxic elements [2, 3]. On the surface and within the tailings, especially in dry periods, blossom, thin crusts and films of technogenic minerals (sulfates, carbonates, silicates, arsenates, etc.) originate [1]. As a result of the processes of hypergenesis and technogenesis, highly mineralized solutions, containing large amounts of heavy metal compounds, are formed in mining waste [4]. They enter surface water and groundwater and migrate over long distances, polluting natural environment components [3, 4].



At the present stage, the role of technogenic environmental pollution in genesis of a number of human diseases has been insufficiently studied. It should be noted that the Solnechny miner's village is located 3 km from the TSF. The population lives in conditions of stable exceeding permissible levels of the pollutants contents, including in atmospheric air [3, 4].

Numerous studies indicate that the child population is more sensitive to the impact of unfavorable environmental factors [5, 9, 10].

Studies in the field of the impact of tin ore mining and processing industry on natural environment components indicate that the problem of the ecosphere pollution is one of the most urgent, especially within the impact areas of closed mining enterprises of the Far Eastern Federal District. The issues of environmental protection are a complex ecological and economic task, including the need to develop and implement a number of environmental protection measures to minimize the negative impact of mining waste on all natural environment components and humans [4], including implementation of environmental monitoring. It is aimed at solving the problems outlined in the Federal Law No. 7 "On environmental protection" [19]. In accordance with Federal Law No. 7, the objectives of environmental monitoring include: 1) monitoring environmental condition, including areas where sources of anthropogenic impact are located; 2) monitoring the impact of anthropogenic sources on the environment; 3) providing the government, legal entities and individuals with reliable information required to prevent and (or) mitigate the adverse consequences of changing environmental condition. In this regard, there is a need to create and develop environmental monitoring system in the study area.

Within the framework of environmental monitoring, multi-year research allowed determining contents of heavy metal compounds in the tailings, soils, vegetation, snow cover, human biological material (hair). The tailings assay confirmed the presence of high contents of heavy metal compounds in them, including the most hazardous ones, such as chromium (Cr), arsenic (As), cadmium (Cd) and

lead (Pb) (in accordance with current classifications). Significant amount of gases is released from the tailings body into the air near the tailings surface. Air pollution here can be classified as extremely high. The aerosol concentration turned out to be 80 times above the baseline. The weighted average concentrations of heavy metal compounds in the snow cover in winter seasons were as follows (mg/dm³): Pb – 0,001; Cd – 0,002; Cr – 0,001.

Contents of As, Cr, Pb compounds in the soils and vegetation exceeded MPCs. In addition, the soil cover is an accumulator of the technogenic pollutants. Soils react slowly to changes in the environment, but they fix and accumulate toxic elements. Within the TSF impact area, accumulation of Pb, Cr, Cd compounds by plants was recorded, mainly in the leaves and roots of the plants.

Assaying hair samples taken from children aged 3 to 14 years living in the Solnechny miner's village for As, Cr, Cd, Pb indicated the following regional features of the elemental status (content of the elements in hairs) in the studied group of children:

- the girls demonstrated an excess of 3.5 times for Cr and 2.61 times for Pb, respectively, in comparison with the averaged data for Russia [20]. In increasing order of the excess, these elements should be positioned as follows: Pb < Cr. The contents of As (0.015 mg/kg) and Cd (0.103 mg/kg) did not exceed the corresponding average values in Russia;

- for the boys, only average Russian Cr content was exceeded by 1.54 times. At the same time, the contents of As (0.015 mg/kg) and Cd (0.103 mg/kg) did not exceed the corresponding average values.

The feature of the elemental status of children in the study group was increased contents of toxic Pb, Cr and As. Our research confirmed the data that a growing child's body actively adsorbs toxic elements. Diseases can be caused both by surplus/deficiency and imbalance of microelements in a body [21–24].

In the course of analyzing the impact of the As, Cr, Pb compounds as carcinogenic factors upon inhalation into a human body [18] in the Solnechny village, the following data on the values of the individual and population risks were obtained (Table 1).

Table 1

Individual and population carcinogenic risks for the Solnechny village inhabitants

Element	Content in air, mg/m ³	SF, (kg · day)/mg	LADD, mg/(kg · day)	CR	PCR
As	0.0032	15	4.7 · 10 ⁻⁵	7.05 · 10 ⁻⁴	9
Cr	0.0017	42	2.5 · 10 ⁻⁵	1.05 · 10 ⁻³	12
Pb	0.0028	0.042	4.2 · 10 ⁻⁵	1.76 · 10 ⁻⁶	< 1



In accordance with the acceptance criteria for the risk due to exposure to the pollutants, the individual carcinogenic risk CR (Cr) = $1.05 \cdot 10^{-3}$ belongs to the fourth range (the individual risk throughout life being equal to or more than $1 \cdot 10^{-3}$), and it is unacceptable neither for population nor for occupational groups. This range is referred to as De manifestis risk, and when it is reached, it is necessary to give recommendations for decision-makers on carrying out emergency curative measures to mitigate the risk. For arsenic ($CR = 7.05 \cdot 10^{-4}$) the population risks exceed the acceptable values for the population. The individual carcinogenic risk caused by lead compounds is acceptable ($CR = 1.76 \cdot 10^{-6}$). To mitigate the negative impact of TSF, containing toxic waste, on ecosystem, special process design solutions have been proposed, the novelty of which was confirmed by patents of the Russian Federation (2017, 2019) [25, 26].

Conclusion

The study findings indicated that the environmental condition within the impact area of the closed tin ore enterprise Solnechny GOK in the Amur Region should be assessed as critical.

Improving the situation within the closed tin ore enterprise impact area is possible with establishing an environmental monitoring center in the study area, the main task of which shall be providing an integrated approach to monitoring of the contents of toxic elements in the biosphere components; organizing an effective system for collecting, processing and transmitting the monitoring results, as well as forecasting. The new methods have been created aimed at ensuring environmental safety of ore processing waste, the novelty of which was confirmed by patents (2017, 2019) [25, 26].

References

1. Zvereva V. P., Kostina A. M., Koval O. V. Technogenic mineral formation as an indicator of ecological condition of tin ore producing districts of the Far East. *Gornyi Zhurnal*. 2009;(4):41–43. (In Russ.).
2. Khanchuk A. I., Krupskaya L. T., Zvereva V. P. Ecological problems of development of tin ore resources in Primorie and Priamurie. *Geography and Natural Resources*. 2012;33(1):46–50. <https://doi.org/10.1134/S1875372812010076>
3. Krupskaya L. T., Grekhnev N. I., Novorotskaya A. G., Utkina E. V., Krupskiy A. V., Rastanina N. K. Features of the migration of toxic chemical elements in the natural environment components within the impact area of the JSC Solnechny GOK Central Processing Plant's tailings storage facility. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2010;(S4):349–361. (In Russ.).
4. Novorotskaya A. G., Krupskaya L. T., Grekhnev N. I., Yakovenko G. P. On the results of environmental monitoring of the air at the Solnechny GOK mining facilities. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2007;(S15):248–258. (In Russ.).
5. Ngole-Jeme V. M., Fantke P. Ecological and human health risks associated with abandoned gold mine tailings contaminated soil. *PLoS ONE*. 2017;12(2):e0172517. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0172517>
6. Karaca O., Cameselle C., Reddy K. R. Mine tailing disposal sites: contamination problems, remedial options and phytocaps for sustainable remediation. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*. 2018;(17):205–228. <https://doi.org/10.1007/s11157-017-9453-y>
7. Martínez-Toledo Á., Montes-Rocha A., González-Mille D.J. et al. Evaluation of enzyme activities in long-term polluted soils with mine tailing deposits of San Luis Potosí, México. *Journal of Soils and Sediments*. 2017;(17):364–375. <https://doi.org/10.1007/s11368-016-1529-8>
8. Xu Zhang, Huanhuan Yang, Zhaojie Cui. Migration and speciation of heavy metal in salinized mine tailings affected by iron mining. *Water Science & Technology*. 2017;76(7):1867–1874. <https://doi.org/10.2166/wst.2017.369>
9. Ying-Nan Huang, Fei Dang, Min Li, Dong-Mei Zhou, Yue Song, Jia-Bin Wang. Environmental and human health risks from metal exposures nearby a Pb-Zn-Ag mine, China. *Science of The Total Environment*. 2020;698:134326. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134326>
10. Kehui Liu, Liuqun Fan, Yi Li, Zhengming Zhou, Chaoshu Chen, Bin Chen, Fangming Yu. Concentrations and health risks of heavy metals in soils and crops around the Pingle manganese



(Mn) mine area in Guangxi Province, China. *Environmental Science and Pollution Research*. 2018;25(30):30180–30190. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2997-8>

11. Lingli Zhou, Bing Yang, Nandong Xue, Fasheng Li, Hans Martin Seip, Xin Cong, Yunzhong Yan, Bo Liu, Baolu Han, Huiying Li Ecological risks and potential sources of heavy metals in agricultural soils from Huanghuai Plain, China. *Environmental Science and Pollution Research*. 2014;21(2):1360–1369. <https://doi.org/10.1007/s11356-013-2023-0>

12. Reza Ali Fallahzadeh, Mohammad Taghi Ghaneian, Mohammad Miri, Mohamad Mehdi Dashti Spatial analysis and health risk assessment of heavy metals concentration in drinking water resources. *Environmental Science and Pollution Research*. 2017;24(32):24790–24802. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0102-3>

13. Nesta Bortey-Sam, Shouta M. M. Nakayama, Yoshinori Ikenaka, Osei Akoto, Elvis Baidoo, Hazuki Mizukawa, Mayumi Ishizuka Health risk assessment of heavy metals and metalloid in drinking water from communities near gold mines in Tarkwa, Ghana. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015;187(7):397. <https://doi.org/10.1007/s10661-015-4630-3>

14. Srivastava A., Siddiqui N.A., Koshe R.K., Singh V.K. Human Health Effects Emanating from Airborne Heavy Metals Due to Natural and Anthropogenic Activities: A Review In: Siddiqui N., Tauseef S., Bansal K. (eds). *Advances in Health and Environment Safety*. Springer Transactions in Civil and Environmental Engineering; 2017, pp. 279–296. https://doi.org/10.1007/978-981-10-7122-5_29

15. Zhu S., Pickles J., He C. Going Green or Going Away: Environmental Regulation, Economic Geography and Firms' Strategies in China's Pollution-Intensive Industries. In: *Geographical Dynamics and Firm Spatial Strategy in China*. Springer Geography. Springer, Berlin, Heidelberg; 2017, pp. 169–197. https://doi.org/10.1007/978-3-662-53601-8_8

16. Musilova J., Arvay J., Vollmannova A. et al. Environmental Contamination by Heavy Metals in Region with Previous Mining Activity. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. 2016;97(4):569–575. <https://doi.org/10.1007/s00128-016-1907-3>

17. PND F 16.1:2.3:3.11–98. *Quantitative chemical analysis of soils. Techniques for measuring the content of metals in solid objects by spectrometry with inductively coupled plasma*. Moscow; 1998. 30 p. (In Russ.).

18. *Guidelines for assessing the risk to public health when exposed to natural environment polluting chemicals*. Moscow: Federal Center of State Sanitary and Epidemiological Control under the Ministry of Health of Russia; 2004. 143 p. (In Russ.).

19. Federal Law of the Russian Federation dated 10.01.2002 No. 7-FZ (as amended on 27.12.2019) “On environmental protection”. (In Russ.).

20. Skalny A.V. Reference values of concentrations of chemical elements in hair, obtained by ICP-AES method. *Trace Elements in Medicine (Moscow)*. 2003;4(1):55–56 (In Russ.).

21. Revich B.A., Avaliani S.L., Tikhonova G.I. *Environment and public health: Regional environmental policy*. Moscow: TsEPR Publ.; 2003. 149 p. (In Russ.).

22. Veltischev Yu E., Fokeeva V. V. *Environment and child health. Chemical ecopathology*. Moscow: Moscow Research Institute of Pediatrics and Pediatric Surgery Publ.; 1996. 57 p. (In Russ.).

23. Rastanina N. K., Krupskaya L. T. On the role of environmental factors in the health of the population of miners' settlements in the south of the Far East. *Ecology and Industry of Russia*. 2008;(12):56–57. (In Russ.).

24. Krupskaya L. T., Rastanina N. K. Krupskaya L. T., Rastanina N.K. Assessment of the public health risk due to air pollution in the vicinity of the Solnechny GOK Central Processing Plant TSF. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2007;(S15):318–323. (In Russ.)

25. Androkhanov V. A, Krupskaya L. T., Belanov I. P. *Method for covering surface of tailings impoundments with inert materials*. Application No. 20161500344 dated 20.12.2016. RF, publ. 08.21.2017, bulletin 24. IPC B0 9S 1/08. (In Russ.)

26. Krupskaya L. T., Ishchenko E. A, Golubev D.A., Kolobanov N.K., Rastanina N.K. RF Patent No. 2707030 dated 21.11.2019. *Composition for reduction of dust load on ecosystem and reclamation of tailings dam surface*. Application No. 2019114495 dated 13.05.2019. (In Russ.)



Information about the authors

Natalia K. Rastanina – Cand. Sci. (Biol.), Assoc. Prof., Department of Chemistry and Chemical Technology, Pacific State University, Khabarovsk, Russian Federation; Scopus ID: [56857552500](#); e-mail: n.rastanina@yandex.ru

Konstantin A. Kolobanov – Pacific State University, Khabarovsk, Russian Federation; Scopus ID: [57211208606](#).

Received 23.05.2020

Revised 12.09.2020

Accepted 05.02.2021



MINING ROCK PROPERTIES. ROCK MECHANICS AND GEOPHYSICS

Research article

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-1-23-30>**Amplitude-dependent hysteresis of wave velocity in rocks in wide frequency range: an experimental study****E. I. Mashinskii** *Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation*✉ MashinskiiEI@ipgg.sbras.ru**Abstract**

This research belongs to the field of rock physics. In recent years, in solid state physics and materials science, new knowledge has emerged about microplastic strain of various materials, including rocks. These data were obtained using high-precision micro- and nanoscale strain measurements. The very fact of the existence of the poorly studied rock property in the earth sciences requires the study of the possible influence of the rock microplasticity on the propagation of seismic and acoustic waves. The studies were carried out using three alternative methods and under different observation conditions. The field measurements were carried out in the zone of low velocities in crosshole space with transmitted waves of frequency of 240–850 Hz. The laboratory measurements were carried out on sandstone samples with transmitted (6.8 kHz) and reflected (1 MHz) waves at the strain of 10^{-8} – 10^{-6} . The manifestations of microplasticity were recorded using high-resolution recording of signals with discretization time $t_{\text{discret}} = 1 \mu\text{s}$ – $40 \mu\text{s}$ and 32.5 ns. The wave amplitude variation was provided in a closed cycle: discrete increasing the amplitude from minimum to maximum and return to the initial value ($A1+ \rightarrow A2+ \rightarrow \dots A_{\text{max}} \dots \rightarrow A2- \rightarrow A1-$). In this amplitude range, an amplitude hysteresis was observed, a sign of which was the inequality of wave velocities on the upward and downward amplitude courses. This effect was recorded for all three measurement methods at different frequencies. However, the amplitude hysteresis of the wave velocity was not observed only in the measurements at full water saturation of loam. The largest amplitude-dependent change in the wave velocity reached 2% (at the accuracy of 0.02%), and the change in the attenuation value amounted to 5%. The reason for this effect could be microplastic inelasticity, which manifested itself by amplitude plateaus located within the waveform. The amplitude microhysteresis forms overall picture of the amplitude dependence of the wave velocity in wide amplitude range. Proposals for the potential use of the obtained data for solving some applied problems have been presented.

Key words

rock physics, wave processes, elastic modulus, wave attenuation, wave velocity hysteresis, microplastic strain, discontinuous inelasticity, amplitude dependence of wave velocity

Acknowledgements

The author thanks G. V. Egorov for conducting experiments and useful discussion when considering the study findings.

For citationMashinskii E. I. Amplitude-dependent hysteresis of wave velocity in rocks in wide frequency range: an experimental study. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021;6(1):23–30. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-1-23-30>

СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД. ГЕОМЕХАНИКА И ГЕОФИЗИКА

Научная статья

Амплитудно-зависимый гистерезис скорости волны в горных породах в широком диапазоне частот: экспериментальное исследование**Е. И. Машинский** *Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука, Сибирское отделение Российской академии наук, г. Новосибирск, Россия*✉ MashinskiiEI@ipgg.sbras.ru**Аннотация**

Это исследование относится к области физики горных пород (Rock Physics). За последние годы в физике твердого тела и материаловедении появились новые знания о микропластической деформации различных материалов, в том числе горных пород. Эти данные получены с помощью высокоточных



измерений деформации на микро- и наноуровне. Сам факт существования мало изученного в науках о Земле свойства горных пород требует изучения возможного влияния микропластичности пород на распространение сейсмических и акустических волн. Исследования проведены по трем альтернативным методикам и при различных условиях наблюдения. Полевые измерения проведены в зоне малых скоростей в межскважинном пространстве на проходящих волнах частотой (240–850) Гц. Лабораторные измерения выполнены на образцах песчаника на проходящих (6,8 кГц) и отраженных волнах (1 МГц) при деформации (10^{-8} – 10^{-6}). Проявления микропластичности зарегистрированы с использованием высокоразрешающей записи сигналов с временем квантования $t_{\text{квант}} = 1$ мкс – 40 мкс и 32,5 нс. Вариация амплитуды волны осуществлялась по замкнутому циклу: дискретное увеличение амплитуды от минимума до максимума и возврат к исходной величине ($A1+ \rightarrow A2+ \rightarrow \dots A_{\text{макс}} \dots \rightarrow A2- \rightarrow A1-$). В этом амплитудном диапазоне имеет место амплитудный гистерезис, признаком которого является неравенство скоростей волн на восходящем и нисходящем амплитудном курсе. Этот эффект зарегистрирован для всех трех методов измерения на разных частотах. Однако амплитудный гистерезис скорости волны отсутствует только в случае измерений при полном водонасыщении суглинков. Наибольшее амплитудно-зависимое изменение скорости волны достигает 2 % (с точностью 0,02 %), а изменение величины затухания составляет 5 %. Причиной такого эффекта может быть микропластическая неупругость, признаками которой являются амплитудные плато, располагающиеся внутри формы волны. Амплитудный микрогистерезис формирует общую картину амплитудной зависимости скорости волны в широком амплитудном диапазоне. Представлены предложения возможного применения полученных данных для решения некоторых прикладных задач.

Ключевые слова

физика горных пород, волновые процессы, затухание волн, гистерезис скорости волны, микропластическая деформация, скачкообразная неупругость, амплитудная зависимость скорости волны

Благодарности

Выражаю благодарность Г. В. Егорову за проведение экспериментов и дальнейшее обсуждение полученных результатов.

Для цитирования

Mashinskii E. I. Amplitude-dependent hysteresis of wave velocity in rocks in wide frequency range: an experimental study. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021;6(1):23–30. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-1-23-30>

Introduction and Challenge Problem

A promising approach to increasing geological efficiency of seismic and acoustic research methods is based on new knowledge in the rock straining physics. This means deep study of the mechanisms of micro- and nanoscale propagation and attenuation of elastic waves. The list of little-known phenomena includes rock microplasticity, which manifests itself at small-scale strains. Wide frequency range of quasi-static and dynamic stresses and strains is of Interest.

Dynamic characteristics of rocks under seismic impacts were studied at large and moderate strains [1]. With studying nonlinear effects in seismic [2–7], the problem of the “elasticity – inelasticity” boundary has become more actual. Taking into account (proceeding from) the experimental data, the boundary strain level was gradually shifted from $\sim 10^{-2}$ – 10^{-3} towards lower strains to $\sim 10^{-6}$. Thus, it was shown that nonlinear effects in rocks are possible even at small strains. This extends the effect of inelastic processes to the field of practical application, where low-intensity waves are used.

At present, seismic theoretical studies are based on the classical viscoelastic model of a standard linear body, which describes well dispersion, relaxation, and related inelastic processes [8, 9]. However, this model does not take into account such a non-standard effect

as the amplitude dependence of wave velocities and attenuation, which was found in many experiments in the course of propagation of seismic and acoustic waves in rocks [10–13]. These were mainly laboratory experiments on hard rock samples extracted from great depths. The experimental data showed that, with increasing the transmitted signal amplitude, decreasing the wave velocity and increasing the attenuation were observed [9, 14, 15]. Other experiments also confirmed the data presented above, but at the same time showed opposite results as well. With increasing the transmitted signal amplitude, both increasing and decreasing the wave velocity and attenuation could occur [6, 11]. The unusual behavior of wave velocities extends to the elastic modulus behavior. The decrease or increase in the elastic modulus took place in accordance with the stress-strain ratio slope of curve [16–20].

Microplastic inelasticity of rocks was discovered in quasi-static experiments on various samples [19]. Microplasticity of metals, alloys and other materials has been known. Its manifestations on the “stress-strain” diagram are presented in the form of “the stress-plateau” and “the stress-drop” [21–24]. This phenomenon can be characterized as some irregular short-term “actuation” of plasticity within the elastic strain range [16, 25–27]. This



thesis has also theoretical substantiation [28, 29]. Below the findings of the P-wave velocity amplitude dependence study in the rocks obtained using different equipment under different experimental conditions are presented.

Research Techniques and Factual Material

Field studies

Field measurements were carried out in a zone of low velocities in loams. In the upper part to a depth of 8.5 m, the rocks were partially water-saturated. P-wave velocity was about 340 m/s. Below there was an aquifer, the wave velocity in which was ~ 1500 m/s. The measurements were carried out using the cross-hole test; the distance between the holes was 7m. In the first spread, the transmitter was installed at a depth of 2 m, and the signal receiver, at a depth of 10 m (2 m–10 m). The wave mainly travelled through partially water-saturated rock. At the second spread, the transmitter and receiver were at a depth of 10 m–10 m, the wave propagated in a rock completely saturated with water.

The seismic signal transmitter consisted of a set of piezoelectric cells placed in a body with a preamplifier [4, 30]. The signal was transmitted through a liquid spacer and a sealed elastic shell that contacted the hole wall. The pulse amplitude on the piezoelectric transducer of the transmitter varied from 350 to 950 V. PDS-21 sensor was used, which had conversion ratio of 100 $\mu\text{V}/\text{Pa}$. The signal receiver was in contact with the hole walls through the elastic liquid spacer. Recording was carried out with signal accumulation up to 128. The signals were digitally recorded on a computer. The measurement accuracy of the pulse propagation time was ~ 0.02%. The recording discretization time $t_{\text{discret}} = 8 \mu\text{s}$ and 40 μs . The strain amplitude range was $(3.8 - 9.8) \times 10^{-8}$.

Laboratory measurements in low kilohertz frequency range

The experiments were performed on a cylindrical sandstone sample 76 mm in diameter and 1 m long. The rock density was 2.0 g/cm^3 , the porosity was about 3%. The P-wave propagation speed was 2910–3000 m/s. The experiment was carried out at room temperature at five values of the strain amplitude in the range of: $(0.3 - 1.67) \times 10^{-6}$.

The transmitter and receiver of the acoustic signals consisted of piezoceramic cells (TsTBS-3), were rigidly mounted on one end of the sample cylinder. At the other end of the sample, a brass washer 3 mm thick was rigidly fixed in the same way. The entire structure was inserted through a jack into the wall opening. The acoustic pulse with frequency of 6835 Hz, having passed along the sample, was reflected

from the opposite end and arrived at the receiver and, through the amplifier, at the digital recording device. The ADC recorder discretization time was 1 μs . The wave velocity measurement accuracy was 0.05%. The relative measurement accuracy determined with the amplitude variation and the other conditions constancy was much higher.

Laboratory measurements at frequency of about 1 MHz

The research was carried out on samples of dry sandstone of cylindrical shape 2.4 cm long and 4.0 cm in diameter. The fine-grained sandstone with the presence of siltstone was sampled from hole at a depth of 2,920 m. The rock density was 2.36 g/cm^3 , the total porosity was 13%. The measuring installation was a three-layer model. The first and third layers (beryllium bronze) provided identical wave reflection at the interfaces. The first layer acted as a delay line, and the third layer acted as an acoustic load. The rock sample was located in between these layers. Excitation and reception of signals was provided by piezoceramic sensors at frequency of ~ 1 MHz, which were polarized to longitudinal wave. Controlled static pressure (20 MPa) ensured constant contact at the boundaries of the layers.

Research Findings

Field testing

The behavior of the P-wave velocity depending on the strain amplitude in the loams is presented for two source and receiver arrangements: the abovementioned spreads of (2 m–10 m) and (10 m–10 m). Fig. 1, *a* presents the dependence of the P-wave velocity on the amplitude when the source was located at a depth of 2 m, and the receiver, at a depth of 10 m. The magnitude of the transmitted signal amplitude varied discretely in a closed cycle. The amplitude increased from A1, A2, A3 to A4 (ascending half cycle), and then its decreased through the same values to A1 (descending half cycle) – and we had got a set of digital records in the full cycle.

The behavior of the P-wave velocity in the loams depending on the strain amplitude was complicated. In the first half cycle of the amplitude course, the wave velocity first decreased and then increased nonlinearly. In the second half cycle, the wave velocity non-monotonically increased. The largest change in the wave velocity in the cycle was 1.7%. There was a clear divergence of the wave velocity "paths" between the upward and downward half cycles. In the A2–A4 range, the wave velocity increased instead of decreasing. Upon completion of the full cycle, we received an open hysteresis loop, which amounted to 0.7%. This was the effect of the amplitude-dependent hysteresis of the P-wave velocity.

Examination of the seismic record showed the presence of unusual complications in the waveform that have been identified as signs of microplastic strain. Individual fragments of the pulses recorded at the three amplitude values are shown in Fig. 1, *b*. These are built-in short-term amplitude plateaus, the length of which ranged from one to several $t_{\text{discret}} = 40 \mu\text{s}$. The instantaneous value of the pulse amplitude did not change over the length of the plateau. These

plateaus interrupted the "normal" amplitude course, i.e. the process of elastic strain and the transition to microplastic flow. The plateau length reached twelve t_{discret} or $480 \mu\text{s}$. The increase in the number of plateaus led to decreasing the pulse front steepness and the pulse pulling. The dependence of the P-wave velocity on the amplitude of strain in the loams at the (10 m – 10 m) spread is shown in Fig. 2, *a*. With increasing the amplitude from A1 to A4, the

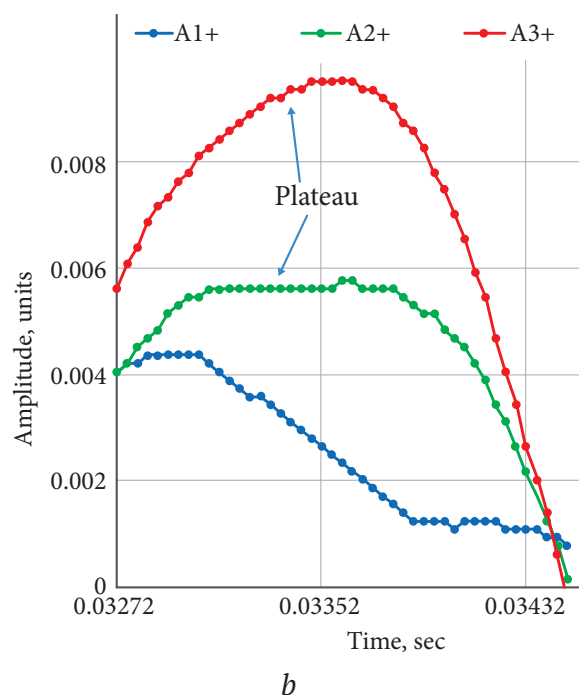
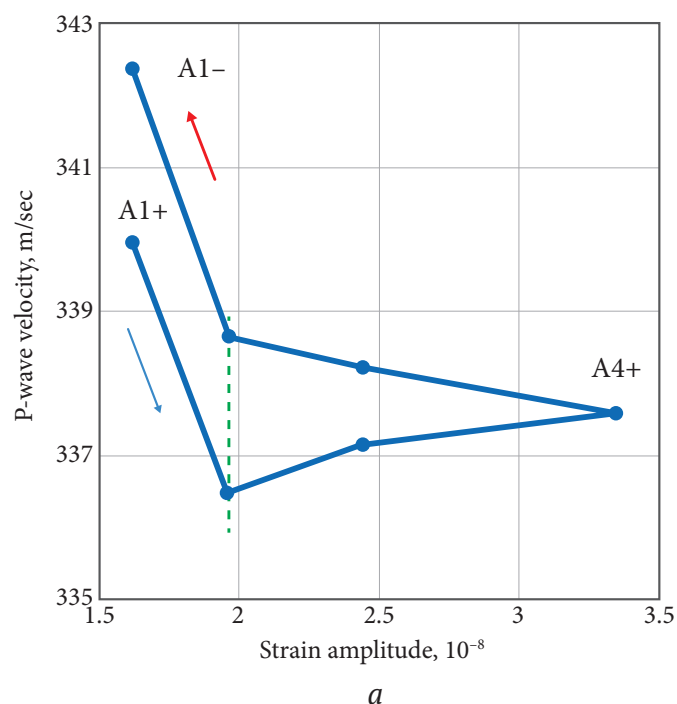


Fig. 1. P-wave velocity in loams depending on the strain amplitude: source at a depth of 2 m, receiver at a depth of 10 m (*a*). Fragments of the impulses with complications in the form of plateau (*b*)

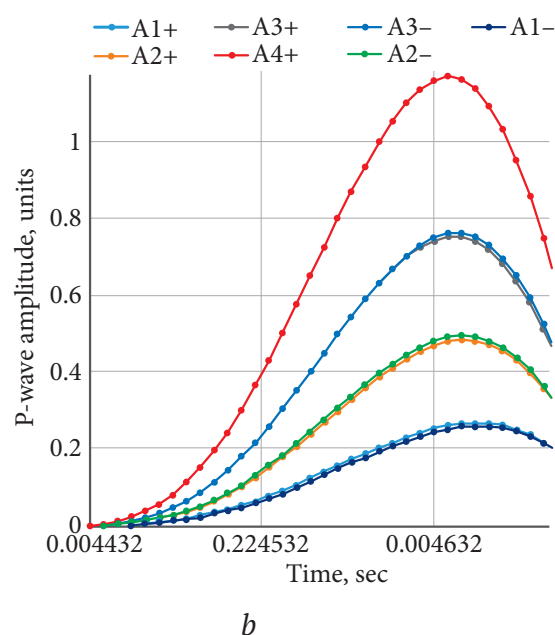
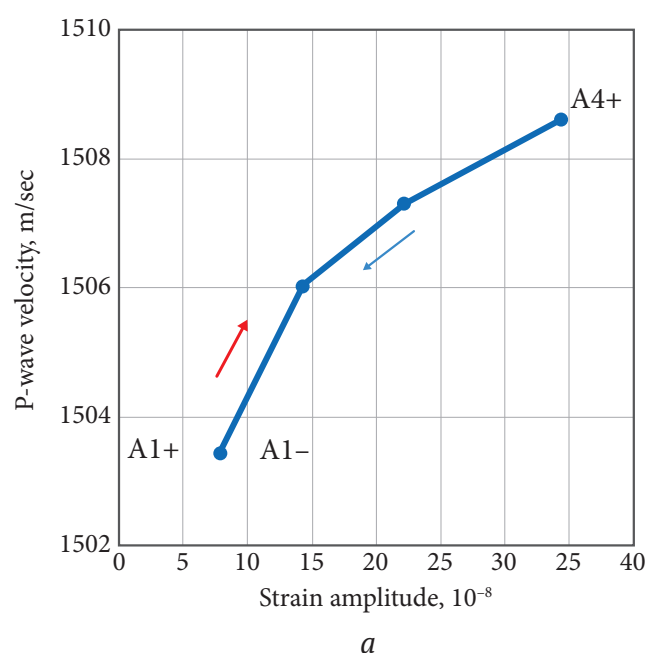


Fig. 2. The P-wave velocity depending on the strain amplitude at the source-receiver spread of 10 m – 10 m (*a*). Fragments of the pulse front at the A1–A4 amplitudes at the source-receiver spread of 10 m – 10 m (*b*)

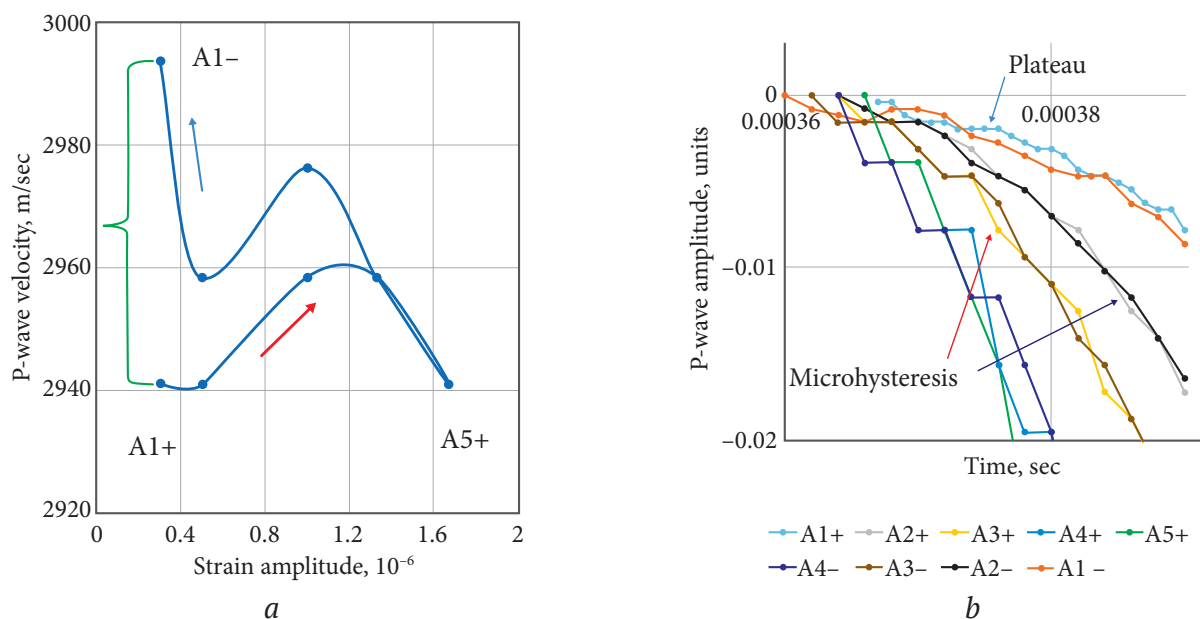


Fig. 3. Fragments of the pulse front at the A1–A4 amplitudes at the source-receiver spread of 10 m – 10 m (a). Plateau manifestation (b). Fragments of the pulses recorded at five amplitudes in the first arrival region (b)

P-wave velocity increased nonlinearly by 0.34%. Here, unlike the previous spread, no amplitude hysteresis was observed. This was an interesting feature of the wave propagation in the fully water-saturated loams. The digital records also showed no plateau on the waveform (Fig. 2, b).

Laboratory experiment at low kilohertz frequencies

P-wave velocity in the sandstone depending on the ascending and descending strain amplitudes is shown in Fig. 3, a. As the amplitude increased from A1+ to A5+, the wave velocity first increased and then decreased. When the amplitude decreased from A5+ to A1–, the wave velocity increased with a large dip, and an open hysteresis loop was observed, which amounted to 1.8%. Fig. 3, b presents the fragments of the pulse front near the first arrival for the five values

of the upward and downward strain amplitude. The acoustic paths had plateaus longer than $t_{\text{discret}} = 2 \mu\text{s}$. These built-in plateaus altered the overall slope of the pulse front.

Microhysteresis was found on the wave profile. This was a short-term deviation of two identical traces (for example, A1+ and A1–, A2+ and A2–, etc.) from the general amplitude course, Fig. 3, b. In this case, the front slope (i.e. strain rate) changed in a small leg. Such legs of microhysteresis alternated with the legs of complete coincidence of the upward and downward courses.

Laboratory experiment at frequency of about 1 MHz

The dependence of the wave velocity on the strain amplitude is shown in Fig. 4. With increasing the amplitude, the P-wave velocity value demonstrated

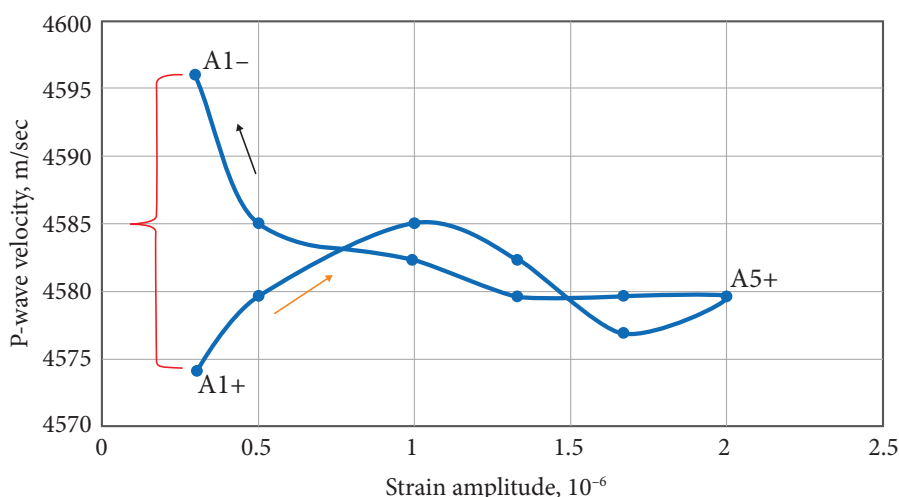


Fig. 4. P-wave velocity in sandstone depending on strain amplitude

wave-like behavior. With decreasing amplitude, the wave velocity increased nonlinearly by 0.36%. The amplitude hysteresis was 0.48%. The shape of the reflected pulses recorded with nanosecond resolution at six amplitude values in the closed measurement cycle evidenced a complicated strain pattern. Fig. 5 presents a fragment of the wave front, where one can see non-standard inelastic manifestations in the form of a plateau, local amplitude drop, and microhysteresis. The duration of these complications amounted to several $t_{\text{discret}} = 32.5$ ns. It should be noted that the records (traces) with upward (A+) and downward (A-) amplitudes, despite some deviations, generally coincide.

Findings Discussion

The effect of microplasticity depends in a complicated fashion on the strain level (the magnitude of the applied mechanical action). The experiments carried out under different conditions showed basically the same results. This confirmed the fact that the strain amplitude influenced the P-wave velocity. The change in the P-wave velocity due to the amplitude influence reached 2%. The latest studies carried out on rock samples using high-precision laser Doppler interferometry showed that the change in wave velocity due to the amplitude influence reached 5% [12, 14, 27].

The amplitude effect was detected at high seismic and kilohertz frequencies with dynamic strains of about

10^{-8} – 10^{-6} , which related to the region of high strain rates. However, the previously obtained results of the quasi-static experiments [16, 20, 26, 28] indicated the possibility of such effect at lower frequencies. Low rates of a solid body straining create even more favorable conditions for the actuation of the microplasticity mechanism [17, 22]. It was detected that at low strain amplitudes, the magnitude of the amplitude hysteresis was greater than at higher amplitudes.

The experiments showed the “overlapping” of the hysteresis loops, and hence the observed increase or decrease in the wave velocity (elastic modulus). A small change in the signal amplitude magnitude (one discrete step ΔA_i) could lead to a noticeable change in the wave velocity. The standard (generally accepted) viscoelastic model for rocks does not allow such behavior of the elastic modulus. The microhysteresis effect requires in-depth study, since its influence on the wave dynamic parameters can be significant.

Conclusion

The amplitude hysteresis effect can be useful for practical applications. The absence of hysteresis in a fully water-saturated rock encourages repeated experiments with this result in mind. The established effect of the local change in the wave velocity in the small range of strain amplitudes is of both fundamental and practical importance. Currently, in seismic methods, the wave velocity sensitivity to the

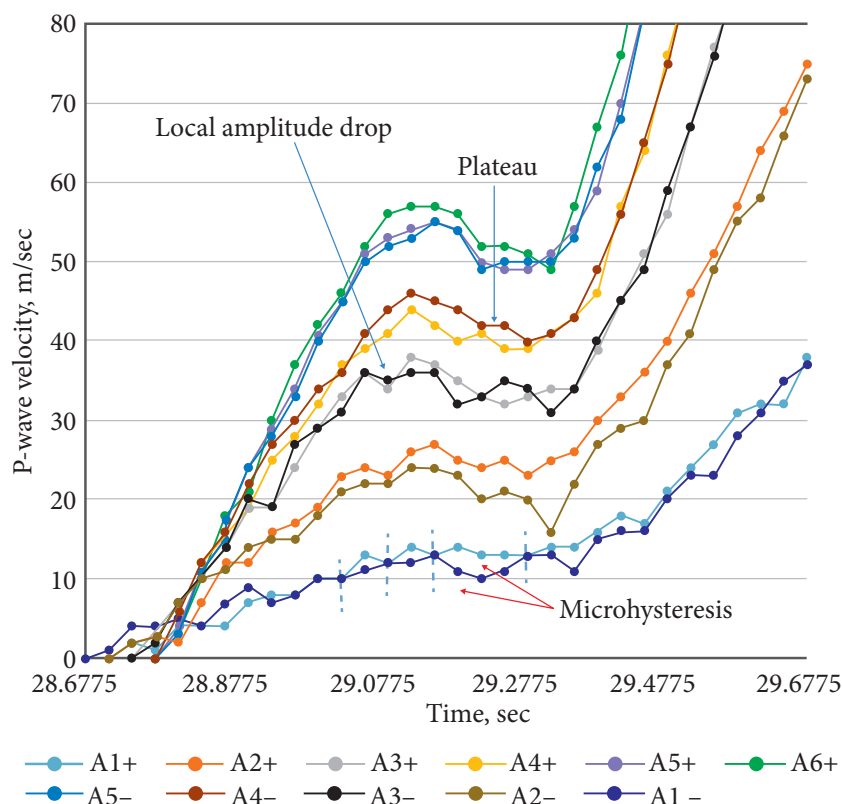


Fig. 5. Fragments of the pulse front in sandstone at six amplitude values



transmitted signal magnitude is not taken into account that reduces the survey accuracy.

In conclusion, we can say that organizations interested in this issue, if they wish, can check the feasibility of applying the amplitude-dependent effect in practice and determine its usefulness for further use. This check does not require any special equipment.

The equipment used for common field work can be used for the check (with some additions). At the very

least, high-precision digital recorders are available for the experimentation. Changing the wave amplitude magnitude is methodically achieved, for example, by successively changing the power of the wave transmission source. Consideration of the amplitude factor can be useful, for example, to reduce errors when constructing a seismic cross-section and in other areas of geophysical surveys. The potential areas of the effect validation and application are seismic exploration, VSP, acoustic logging and others.

References

1. Voznesensky E. A. *Soil behavior under dynamic loads*. Moscow: Moscow University Publ.; 1998. 320 p. (In Russ.).
2. Gushchin V. V., Shalashov G. M. On the feasibility of using nonlinear seismic effects in the problems of vibrational transmission (seismic survey) of the Earth. In: Nikolaev A. V., Galkin I. N. *The Earth exploration by non-explosive seismic sources*. Moscow: Nauka, 1981, pp. 144–155. (In Russ.).
3. Gushchin V.V., Pavlenko O.V. Study of nonlinear elastic properties of rocks based on seismic data. *Sovremennaya seismologiya. Dostizheniya i problemy*. 1998;13. (In Russ.).
4. Egorov G. V. Variations of nonlinear parameters of a consolidated porous water-saturated sample depending on the degree of gas saturation. *Fizicheskaya mezomekhanika*. 2007;10(1):107–110. (In Russ.).
5. Nikolaev A. V. *Problems of nonlinear seismic*. Moscow: Nauka; 1987. 288 p. (In Russ.).
6. Johnston D. H., Toksoz M. N. Thermal cracking and amplitude dependent attenuation. *Journal of Geophysical Research*. 1980;85:937–942.
7. Ostrovsky L. A., Johnson P. A. Dynamic nonlinear elasticity in geomaterials. *La Rivista del Nuovo Cimento*. 2001;24:1–46. <https://doi.org/10.1007/BF03548898>
8. Kondratyev O. K. *Seismic waves in Absorbing Media*. Moscow: Nedra; 1986. 176 p. (In Russ.).
9. Mavko G. M. Friction Attenuation: An Inherent Amplitude Dependence. *Journal of Geophysical Research*. 1979;84(9):4769–4775.
10. Nishino Y., Asano S., Amplitude-dependent internal friction and microplasticity in thin-film materials. *Journal de Physique*. 1996;(06):C8-783–C8-786. <https://doi.org/10.1051/jp4:19968167>
11. Nourifard N., Lebedev M. Research note: the effect of strain amplitude produced by Ultrasonic waves on its velocity. *Geophysical Prospecting*. 2019;67(4):715–722. <https://doi.org/10.1111/1365-2478.12674>
12. Nourifard N., Mashinskii E., Lebedev M. The effect of wave amplitude on S- wave velocity in porous media: an experimental study by Laser Doppler Interferometry. *Exploration Geophysics*. 2019;50(6):683–691. <https://doi.org/10.1080/08123985.2019.1667228>
13. Zaitsev V. Yu., Nazarov V. E., Talanov V. I. Experimental Study of the self-action of seismoacoustic waves. *Acoustic Physics*. 1999;45(6):720–726.
14. Tutuncu A. N., Podio A. L., Sharma M. An experimental investigation of factors influencing compressional- and shear-wave velocities and attenuations in tight gas sandstones. *Geophysics*. 1994;59(1):77–86. <https://doi.org/10.1190/1.1443536>
15. Winkler K. W., Nur A., Gladwin M. Friction and seismic attenuation in rocks. *Nature*. 1979;277:528–531. <https://doi.org/10.1038/277528a0>
16. Derlet P. M., Maaf R. Micro-plasticity and intermittent dislocation activity in a simplified micro structural model. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*. 2013;21(3):035007. <https://doi.org/10.1088/0965-0393/21/3/035007>
17. Guyer R. A., McCall K. R., Boitnott G. N. Hysteresis, Discrete Memory and Nonlinear Wave Propagation in Rock: a New Paradigm. *Physical Review Letters*. 1995;74(17):3491–3494. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.74.3491>
18. Guyer R. A., Johnson P. A. Nonlinear mesoscopic elasticity: Evidence for a new class of materials. *Physics Today*. 1999;52(4):30–36.



19. Mashinskii E. I. Difference between static and dynamic elastic moduli of rocks: Physical causes. *Russian Geology and Geophysics*. 2003;44(9):953–959.
20. McCall K. R., Guyer R. A. Equation of State and Wave Propagation in Hysteretic Nonlinear Elastic Materials. *Journal of Geophysical Research. Solid Earth*. 1994;99:23887–23897. <https://doi.org/10.1029/94JB01941>
21. Duretz, T., Souche, A., Borst R., Le Pourhiet, L. The Benefits of Using a Consistent Tangent Operator for Viscoelastoplastic Computations in Geodynamics. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2018;19(12):4904–4924. <https://doi.org/10.1029/2018GC007877>
22. Golovin I. S., Sinning H.-R., Goken J. Riehemann W. Fatigue-related damping in some cellular metallic materials. *Materials Science and Engineering: A*. 2004;370(1-2):537–541. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.08.090>
23. Golovin I. S., Pavlova T. S., Golovina S. B. et al. Effect of severe plastic deformation of Fe–26 at. Al and titanium on internal friction. *Materials Science and Engineering: A*. 2006;442(1–2):165–169. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2005.12.081>
24. Sajeva A., Filograsso R., Capaccioli S. Including plastic behaviour in the Preisach-Mayergoyz space to find static and dynamic bulk moduli in granular media. In: *Conference: SEG Technical Program Expanded Abstracts*; 2018. <https://doi.org/10.1190/segam2018-2994837.1>
25. Kim J.-Y., Qu J., Jacobs L. J., Littles J. W., Savage M. F. Acoustic Nonlinearity Parameter Due to Microplasticity. *Journal of Nondestructive Evaluation*. 2006;25(1):28–36. <https://doi.org/10.1007/s10921-006-0004-7>
26. Mashinskii E. I. Jump-like inelasticity in sandstone and its effect on the amplitude dependence of P-wave attenuation: An experimental study. *Wave Motion*. 2020;97:102585. <https://doi.org/10.1016/j.wavemoti.2020.102585>
27. Wang J., Li Q., Yang Ch., Zhou C. Repeated loading model for elastic–plastic contact of geomaterial. *Advances in Mechanical Engineering*. 2018;10(7):1–15. <https://doi.org/10.1177/1687814018788778>
28. Yarushina V. M., Podladchikov Y. Y. Microscale yielding as mechanism for low-frequency intrinsic seismic wave attenuation. In: *70th EAGE Conference & Exhibition*, June 2008. Rome, Italy; 2008, pp. 9–12. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20147947>
29. Zhou C., Bulent Biner, Richard LeSar. Discrete dislocation dynamics simulations of plasticity at small scales. *Acta Materialia*. 2010;58:1565–1577. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2009.11.001>
30. Egorov G. V., Nosov V. M., Man'kovskiy V. V. Experimental estimation of nonlinear elastic parameters of dry and fluid-saturated porous medium. *Geologiya i geofizika*. 1999;40(3):457–464. (In Russ.)

Information about the author

Eduard I. Mashinskii – Dr. Sci. (Geol. and Min.), Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, SCOPUS ID: [8886240600](https://orcid.org/0000-0002-8886-2406); Novosibirsk, Russia; e-mail: MashinskiiEI@ipgg.sbras.ru

Received 07.01.2021

Revised 07.02.2021

Accepted 08.02.2021



СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД. ГЕОМЕХАНИКА И ГЕОФИЗИКА

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-1-31-41>**Определение технологических параметров призмы обрушения уступов, отвалов и дорог**И. К. Чунуев¹  , Ю. М. Левкин² , Ж. Болотбеков¹¹ Кыргызский государственный университет геологии, горного дела и освоения природных ресурсов им. акад. У.А. Асаналиева (КГГУ), г. Бишкек, Киргизия² Союз маркшейдеров России, г. Москва, Россия lev5353@bk.ru**Аннотация**

Маркшейдерские работы при производстве горных работ имеют особое значение, так как от их качества, оперативности и достоверности зависят все технологические процессы полного жизненного цикла горного предприятия и в конечном итоге его конкурентоспособность. Организации самостоятельно определяют структуру маркшейдерских служб с учетом реализуемых технологий и масштабов добычи полезных ископаемых. Для обеспечения безопасной добычи полезного ископаемого открытым способом необходимо постоянно осуществлять оценку и контроль состояния массива горных пород уступов и бортов карьера. Недооценка физико-механических свойств горных пород, несоблюдение технологического цикла добычи и транспортировки полезных ископаемых, изменение климатических условий и другие приводят к нарушению устойчивости горных пород на всех участках карьера, в том числе на участках добычи и движения горнотранспортного оборудования. Существующая практика показывает, что эффективность расчёта устойчивости бортов и уступов карьеров достигается благодаря методике, которая должна учитывать механизм разрушения и деформации откосов, а также характер напряжённо-деформированного состояния массива пород карьера. Исследования, представленные в работе, основываются на сравнительном анализе параметров призмы обрушения уступов, отвалов и дорог на карьерах аналитическим и графическим методами с помощью компьютерных программ, а также с учетом статической нагрузки от самосвалов. Результаты исследования позволили установить, что: определение устойчивости откосов уступов и ширины призмы обрушения, выполненные аналитическим методом, дает более высокие результаты точности, чем полученные графическим методом; устойчивость откосов уступов и ширина призмы обрушения зависят не только от физико-механического состояния горных пород, но также от высоты уступа, веса автосамосвала и его груза, приходящегося на 1 п. м площадки размещения, расстояния от бровки откоса и других факторов; массив горных пород находится в спокойном состоянии, не подвержен оползневым явлениям, до тех пор, пока суммы удерживающих сил больше или равны сумме сдвигающих сил; при использовании на открытых горных работах крупногабаритного транспортного оборудования нестандартного веса необходимо производить расчеты безопасной ширины призмы обрушения с учетом нагрузок от них из расчёта на 1 п. м, величины которых могут быть в 1,5–2,0 раза выше расчетных по кругло-цилиндрической поверхности скольжения.

Ключевые слова

горное дело, карьер, открытые горные работы, уступ, призма обрушения, откос, отвал, самосвал, нагрузки, устойчивость

Для цитирования

Чунуев И. К., Левкин Ю. М., Болотбеков Ж. Определение технологических параметров призмы обрушения уступов, отвалов и дорог. *Горные науки и технологии*. 2021;6(1):31–41. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-1-31-41>

MINING ROCK PROPERTIES. ROCK MECHANICS AND GEOPHYSICS

Research article

Determination of bench, dump and road sliding wedge technological parametersI. K. Chunuev¹  , Yu. M. Levkin² , Zh. Bolotbekov¹¹ The Asanaliev Kyrgyz State University of Geology, Mining and Development of Natural Resources (KGGU), Bishkek, Kyrgyzstan² Union of Surveyors of Russia, Moscow, Russian Federation lev5353@bk.ru**Abstract**

Mine surveying in mining operations is of particular importance, since all technological processes of the full life cycle of a mining enterprise and, ultimately, its competitiveness depend on the surveying quality, efficiency and reliability. Organizations independently determine the structure of mine surveying services,



taking into account the methods applied and the scale of mining. To ensure safe open-pit mining of minerals, it is necessary to permanently assess and monitor the pit bench and wall rock mass condition. Misjudgement of rock physical and mechanical properties, non-observance of the minerals mining and transportation process cycle, changes in climatic conditions and other problems lead to loss of stability of rocks in all parts of an open pit, including in the areas of ore production and mining and transport equipment operation. The existing practice shows that the effectiveness of an open pit wall and bench stability calculation can be achieved using a technique that should take into account the slope deformation and failure mechanism, as well as the nature of the stress-strain state of the open pit rock mass. The studies presented in the paper are based on comparative analysis of the sliding wedge parameters for benches, dumps and roads at open pits using analytical and graphical software packages, and taking into account the static load produced by dump trucks. The study findings allow to establish that: determination of the bench slope stability and the sliding wedge width, performed by the analytical method, gives higher accuracy results than those obtained by the graphical method; the bench slope stability and the sliding wedge width depend not only on the rock physical and mechanical condition, but also on the bench height, the dump truck (plus its freight load) weight per 1 linear meter of the placement area, the distance from the slope edge and other factors; the rock mass is stable and not subject to landslide phenomena for as long as the sum of the holding forces is greater than or equal to the sum of the shearing forces; when using large-sized transport equipment of non-standard weight in open-pit mining, it is necessary to calculate the safe width of the sliding wedges, taking into account the loads on them (per 1 linear meter), the values of which can be 1.5–2.0 times higher than those calculated for the circular-cylindrical sliding surface.

Key words

mining, open pit, open-pit mining, bench, sliding wedge, slope, dump, dump truck, loads, stability

For citation

Chunuev I. K., Levkin Yu. M., Bolotbekov Zh. Determination of bench, dump and road sliding wedge technological parameters. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021;6(1):31–41. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-1-31-41>

Введение

Маркшейдерские работы при производстве горных работ имеют особое значение, так как от их качества, оперативности и достоверности зависят все технологические процессы полного жизненного цикла горного предприятия и в конечном итоге его конкурентоспособность.

Основные этапы и технологические требования к производству маркшейдерских работ формализуются в нормативно-методических материалах, таких, например, как «Инструкции по производству маркшейдерских работ», утвержденные Федеральным горным и промышленным надзором России.

В соответствии с этим документом маркшейдерские работы относятся в Российской Федерации к лицензируемому виду деятельности, а также предусматривают:

- пространственно-геометрические измерения горных разработок и подземных сооружений, определение их параметров, местоположения и соответствия проектной документации;
- наблюдение за состоянием горных отводов и обоснование их границ; ведение горной графической документации;
- учет и обоснование объемов горных разработок; определение опасных зон и мер охраны горных разработок, зданий, сооружений и природных объектов от воздействия работ, связанных с использованием недрами [1, 2].

Организации самостоятельно определяют структуру маркшейдерских служб и технологии их реализации с учетом масштабов добычи полезных ископаемых.

Использование маркшейдерских измерительных систем**на современных карьерах для обеспечения безопасного ведения работ**

Значительный прогресс, достигнутый в последние десятилетия в новых технологиях производства маркшейдерских работ, сформировал большой рынок эффективных технических решений для их качественного выполнения. Все эти решения используют технологии производства измерений спутниковым геодезическим оборудованием.

Спутниковые системы «ГЛОНАСС» и GPS, в состав геодезической аппаратуры которых входят базовая станция и две передающие антенны (роверы), позволяют определять координаты базовой станции от пунктов триангуляции. Измерения производят передающими антеннами путем установки их на заранее определённые точки в карьере, нажимают на пуск и передают сигнал на базовую станцию, с базовой станции сигнал поступает на спутник и возвращается с координатами ровера. Данные полученных измерений накапливаются в карте-памяти базовой станции (рис. 1). Именно таким образом можно представить в первом приближении общую структуру маркшейдерских измерений на основе спутниковых технологий. Их очевидные преимущества (высокая производительность, точность и помехоустойчивость работ, возможность реализации непрерывных измерений практически в реальном масштабе времени, независимость от оптических характеристик земной атмосферы и оптической наблюдаемости объектов измерения и т.д.) не исключают наличия определенных сложностей (погрешности при измерении верти-

кальных и горизонтальных координат, слабая помехозащищённость от электромагнитных возмущений, сложность наблюдения при ведении подземных горных работ; высокая стоимость оборудования и т.д.), которые необходимо учитывать при составлении проектов ведения соответствующих работ.

Открытые горные работы на горных предприятиях реализуются в разных климатических зонах, в том числе таких, где погодные условия могут изменяться в широком диапазоне не только в зависимости от времени года, но и в течение рабочих смен предприятия. Обильные осадки и частые перепады температур являются одними из самых существенных факторов, влияющих на устойчивость мест карьера, опасных по сходу оползней. Наблюдения показали, что при наличии обильных осадков деятельность предприятия может быть нарушена или полностью прекращена на участках залегания глин, склонных к сползанию, в связи с чем необходима разработка мероприятий, обеспечивающих укрепление участков грунта, содержащего глины и провоцирующие оползни.

Для обеспечения безопасной добычи полезного ископаемого открытым способом на карьерах необходимо постоянно осуществлять оценку и контроль состояния массива горных пород уступов и бортов карьера [3–9]. Недооценка физико-механических свойств горных пород, несоблюдение технологического цикла добычи и транспортировки полезных ископаемых, изменение климатических условий и другие приводят к нарушению устойчивости горных пород на всех участках карьера, в том числе участках добычи и движения горнотранспортного оборудования.

Изменения физико-механических свойств пород откосов и уступов в зависимости от технологических параметров приводят к проявлению деформационных явлений (оползни, обрушения, осыпи,

просадки), что вызывает снижение объёмов добычи полезного ископаемого, выход из рабочего процесса добычного и транспортного оборудования, увеличение дополнительных расходов на работы по их восстановлению [9–13]. Основными причинами деформационных явлений на карьере, как правило, являются: неполноценный учёт водопритокков, вызванных осадками, гидрогеологических и инженерно-геологических условий карьера при составлении плана добычи полезного ископаемого; несоблюдение проектных параметров добычи; динамическое воздействие горнотранспортного оборудования и взрывных работ. Немаловажную роль в устойчивости бортов и уступов карьера играет фактор времени, позволяющий снижать прочностные характеристики горных пород по природным и горнотехническим условиям.

Обвалы и осыпи характерны для уступов и бортов карьера, по строению и составу массива горных пород, состоящих из полускальных и скальных пород [14]. На величину и скорость осыпания горных пород оказывают влияние: петрографический состав, трещиноватость, обводненность и температурный режим пород; динамические воздействия (взрывные работы и движение горнотранспортного оборудования).

Качественные и направленные маркшейдерские наблюдения на карьерах позволяют построить предельную поверхность скольжения и определить условия движения сползающей части уступа. Инклинометрические измерения, проводимые через пробуренные скважины в оползневом массиве, показывают глубину и величину изменения положения поверхности скольжения оползня. Наибольшему искривлению в оползневом массиве подвергается отрезок скважины, расположенный на территории формирования поверхности скольжения [2, 15, 16].

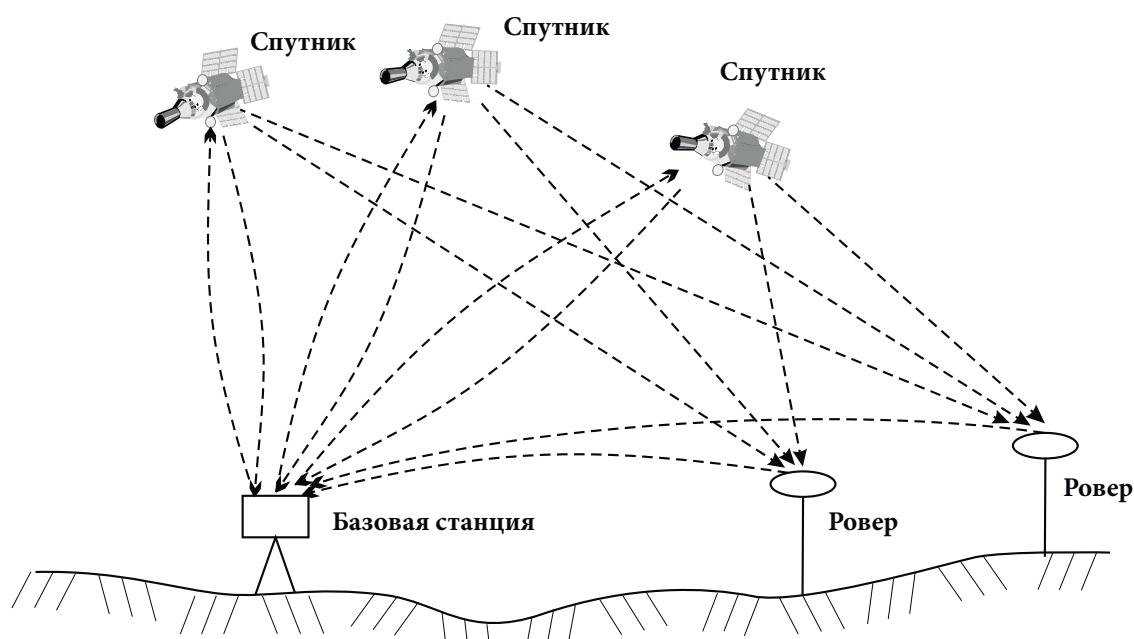


Рис. 1. Схема общей структуры маркшейдерских измерительных систем на основе спутниковых технологий

Fig. 1. General arrangement of surveying measuring systems based on satellite technology



Механизм деформации карьерных откосов

Существующая практика показывает, что эффективность расчёта устойчивости бортов и уступов карьеров достигается благодаря методике, которая должна учитывать механизм разрушения и деформации откосов, а также характер напряжённо-деформированного состояния массива пород карьера [17].

Можно выделить четыре кинематические формы разрушения откоса:

- стационарное неравновесное разрушение (развитие поверхности скольжения в откосе под воздействием постоянных гравитационных сил, достигших критического значения за счёт превышения параметров откоса (высоты и угла наклона откоса), при которых обеспечивалась его устойчивость);

- стационарное равновесное разрушение (наблюдается при отсыпке отвала в непосредственной близости от верхней бровки откоса);

- нестационарное неравновесное разрушение (наблюдается при интенсивном выветривании горных пород или в откосах, сложенных глинистыми породами с ярко выраженными реологическими свойствами);

- нестационарное неравновесное динамическое разрушение (наблюдается при воздействии на массив нагрузок массовых взрывов и горнотранспортного оборудования) [9].

Считается, что процесс разрушения откоса может протекать как в связи с последовательным прорастанием поверхности скольжения от точки к точке, так и в виде параллельного формирования площадок скольжения в нижней и верхней частях откоса [9].

Обеспечение долговременной и безопасной эксплуатации карьера закладывается правильным выбором методики расчёта углов наклона его бортов, которая должна учитывать:

- устойчивость уступов и бортов карьера;
- размещение на бортах необходимых съездов и берм;
- экономичность работ (целесообразный коэффициент вскрыши, выбор контура откоса) [9].

Существующие методы оценки устойчивости бортов карьеров условно делятся на строгие и приближённые группы. В строгих методах расчёта применяется математический аппарат механики сплошных сред. На практике применяются приближённые методы расчёта, которые определяют, что устойчивость горных пород в откосах может быть обеспечена, если сумма сил, удерживающих откос от сдвига по наиболее слабой поверхности, больше суммы сдвигающих сил по этой поверхности. Коэффициент запаса устойчивости обеспечивается, если отношение суммы удерживающих сил к сумме сдвигающих – наибольшее. Поверхность, на которой это отношение наименьшее, считается слабой. На устойчивость откосов большое влияние оказывает наличие в окрестностях карьера открытых и подземных водостоков, водоносных горизонтов, водоёмов.

Разработка моделей определения и прогнозирования призм обрушения уступов на контуре карьера является достаточно известным направлением

[2–5, 10, 11, 15, 18–24]. При этом рассматривались разные горно-геологические и технологические условия

Форма и расположение поверхности скольжения в неослабленном массиве, прилегающем к откосу, определяются основными положениями теории предельного равновесия сыпучей среды, основы которой были заложены еще в XVIII в.

К. Кулон определил основные положения теории равновесия сыпучих сред, а также применил их для определения состояния массивов из сыпучих сред, ограниченных горизонтальной плоскостью, на вертикальную подпорную стенку [25].

Дальнейшие работы позволили на основе уже выработанных принципов получить решения для разной геометрии подпорных стенок с разными характеристиками скольжения этих стенок. В XIX в. В. Ренкин исследовал предельное равновесие бесконечного массива, ограниченного наклонной плоскостью [26]. Последующие экспериментальные исследования В. И. Курдюмова позволили установить, что нарушение равновесия происходит путем сползания по некоторым криволинейным поверхностям [27]. Дальнейшие исследования в этой области велись многими учеными, и они были направлены на решение как фундаментальных, так и прикладных задач. Российская инженерная школа опирается на фундаментальные труды В. В. Соколовского, которые дают наиболее полное описание явлений и направлений технических решений в части формализации состояния сыпучих сред в статике и определения устойчивости массивов сыпучих сред [28]. Известные в области горного дела ученые также внесли свой вклад в развитие этого направления, создавая комплексное научное и методическое обеспечение для решения горнотехнических задач. Примером таких работ стали работы М.М. Протодяконова, К. В. Руппенейта, С. Г. Авершина [29–31].

Перейдем к практике определения размеров призмы обрушения рабочих и нерабочих уступов карьера с учетом конкретных условий и технологических параметров [18–23].

Определение устойчивости откосов уступов и ширины призмы обрушения на карьере «Кумтор»

Определение размеров призмы обрушения рабочих и нерабочих уступов, а также на отвалах, выполнено по известной методике ВНИМИ [19, 22]. Форма и расположение поверхности скольжения в неослабленном массиве, прилегающем к откосу уступа, определяются основными положениями теории предельного равновесия сыпучей среды:

а) элементарные площадки скольжения в неоднородном массиве горных пород возникают лишь при напряжении σ_1 , не менее:

$$\sigma_0 = \sigma_1 = 2k \cdot ctg\varepsilon, \quad (1)$$

где k – сцепление породы; $\varepsilon = 45^\circ - \varphi/2$; φ – угол внутреннего трения породы;

б) в массиве однородного откоса площадки скольжения возникают с глубины:



$$H_{90} = \frac{\sigma_0}{\gamma} = \frac{2k}{\gamma} \operatorname{ctg} \varepsilon, \quad (2)$$

где γ – объемный вес пород.

Определение ширины призмы обрушения выполнено двумя методами – графическим и аналитическим [1, 19, 22–24]. Параметры графического определения ширины призмы возможного обрушения в породах отражены в табл.1:

– по заданным физико-механическим характеристикам пород определяется глубина, на которой формируется площадка скольжения – H_{90} ;

– затем определяется условная высота откоса H' как отношение

$$H' = \frac{H}{H_{90}};$$

– действительная ширина призмы обрушения a определяется умножением условной ширины призмы обрушения a' на величину глубины, на которой формируется площадка скольжения – H_{90} .

Аналитическое определение ширины призмы возможного обрушения выполнялось по следующей формуле:

$$a = \frac{2H \left[1 - \operatorname{ctg} \alpha \cdot \operatorname{tg} \left(\frac{\alpha + \varphi}{2} \right) \right] - 2H_{90}}{\operatorname{ctg} \varepsilon + \operatorname{tg} \left(\frac{\alpha + \varphi}{2} \right)}. \quad (3)$$

Сравнительный анализ результатов расчёта параметров призмы возможного обрушения для уступов карьера показал, что использование аналитического метода расчета даёт более высокую точность, чем результаты, полученные графическим методом (табл. 1).

Кроме того, ширина призмы обрушения различна для различных типов пород, слагающих уступы. Поэтому при значении условной высоты откоса встроенного уступа в моренах 45,67 м, которая вышла за пределы **графического расчёта**, что соответствует наибольшему из значений, полученных аналитическим расчётом, ширина призмы обрушения для пород морены составляет 2,17 м, а для коренных пород 3,07 м. При условной высоте откоса рабочего уступа в моренах 22,83 м ширина призмы обрушения для пород морены составляет 2,43 м, а для коренных пород 1,28 м.

Для пород отвалов (табл. 2) при условной высоте откоса пород морены 30,49 м значение ширины призмы возможного обрушения в породах морены составляет 2,21 м. Но так как из расчёта принимается наибольшее значение ширины призмы обрушения, необходимо считать, что принятое значение с запасом перекрывает величину призмы возможного обрушения в горной породе морена. Определение ширины призмы возможного обрушения с учётом характеристик пород, приведенных в табл. 1 и 2, выполнено с использованием метода кругло-цилиндрической поверхности с применением компьютерных программ [20, 21].

Таблица 1 / Table 1

Расчетная ширина призмы возможного обрушения для уступов карьера

Estimated width of the possible sliding wedge for open pit benches

Наименование, параметр	Встроенный уступ в предельном положении						Рабочий уступ					
	Графический расчет			Аналитический расчет			Графический расчет			Аналитический расчет		
Тип породы	Породы коренные	Морена	Породы отвала	Породы коренные	Морена	Породы отвала	Породы коренные	Морена	Породы отвала	Породы коренные	Морена	Породы отвала
Высота уступа H , м	24	24	24	24	24	24	8	8	8	8	8	8
Угол откоса α , град.	63,4	35	37	63,4	35	37	80	60	60	80	60	60
Угол внутреннего трения пород φ , град.	32	28	32	32	28	32	32	28	32	32	28	32
Сцепление пород K , т/м ²	5	0,3	0,5	5	0,3	0,5	3	0,2	0,3	3	0,2	0,3
Объемный вес породы γ , т/м ³	2,85	1,9	2,2	2,85	1,9	2,2	2,85	1,9	2,2	2,85	1,9	2,2
Глубина H_{90} , с которой возникают площадки скольжения, м	6,33	0,53	0,82	6,33	0,53	0,82	3,80	0,35	0,49	3,80	0,35	0,49
Условная высота откоса H' (H/H_{90})	3,79	45,67	29,27				2,11	22,83	16,26			
Условная ширина призмы обрушения a' (по графику на рис.)	0,46	1,92*	1,32				0,28	1,42	0,99			
Ширина призмы обрушения a, м	2,91	1,01	1,08	3,07	2,17	1,04	1,06	0,50	0,49	1,28	2,43	1,92

Таблица 2 / Table 2

Расчетная ширина призмы возможного обрушения для отвалов различной высоты

Estimated width of the possible sliding wedge for dumps of different heights

Наименование, параметр	Отвал породы					
	Графический расчет			Аналитический расчет		
Высота отвала H , м	25	50	90	25	50	90
Угол откоса α , град.	37	37	37	37	37	37
Угол внутреннего трения пород φ , град.	32	32	32	32	32	32
Сцепление пород K , т/м ²	0,5	1	1,5	0,5	1	1,5
Объемный вес породы γ , т/м ³	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2
Глубина H_{90} , с которой возникают площадки скольжения, м	0,82	1,64	2,46	0,82	1,64	2,46
Условная высота откоса H' (H/H_{90})	30,49	30,49	36,58			
Условная ширина призмы обрушения a' (по графику на рис. 1)	1,35	1,35	1,49			
Ширина призмы обрушения a, м	1,11	2,21	3,67	1,11	2,21	4,38

Определение влияния большегрузного транспорта на устойчивость откосов уступов и ширину призмы обрушения на карьере «Кумтор»

Расчёт ширины призмы возможного обрушения на встроенных и рабочих уступах, а также отвалах позволил выполнять оценку их устойчивости при воздействии на эти уступы и отвалы нагрузки горного оборудования. Наиболее тяжелым горным оборудованием на карьере «Кумтор» является автосамосвал Cat 785C, полная масса которого с грузом составляет 250 т [21].

Для расчёта влияния веса автосамосвала, проходящего на 1 п. м уступа высотой 24 м, на устойчивость откосов уступов и ширину призмы обрушения при движении автосамосвала вдоль бровки транспортной бермы по всей протяженности кромки откоса вдоль колеи, расположенной ближе к кромке откоса, на расстоянии, равном ширине призмы обрушения – 3,5 м, используется выражение:

$$\Delta P = \frac{P}{a_k + 2 \times \frac{1}{3} \times c_i}, \quad (4)$$

где a_k – расстояние между колесами автомобиля (база); P – вес гружёного автомобиля, приходящийся на одну

колею; c_i – расстояние от самосвала до края призмы обрушения (рис. 2, 3).

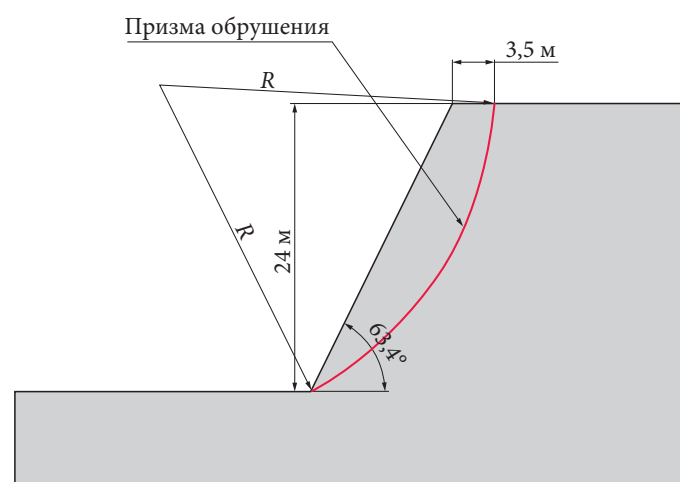

Рис. 2. Определение влияния веса груженого автосамосвала, приходящегося на 1 п. м встроенного и рабочего уступов и отвала высотой уступа 24 м

Fig. 2. Determination of the dump truck loaded weight effect on working bench and dump bench (per 1 linear meter) at the bench height of 24 m

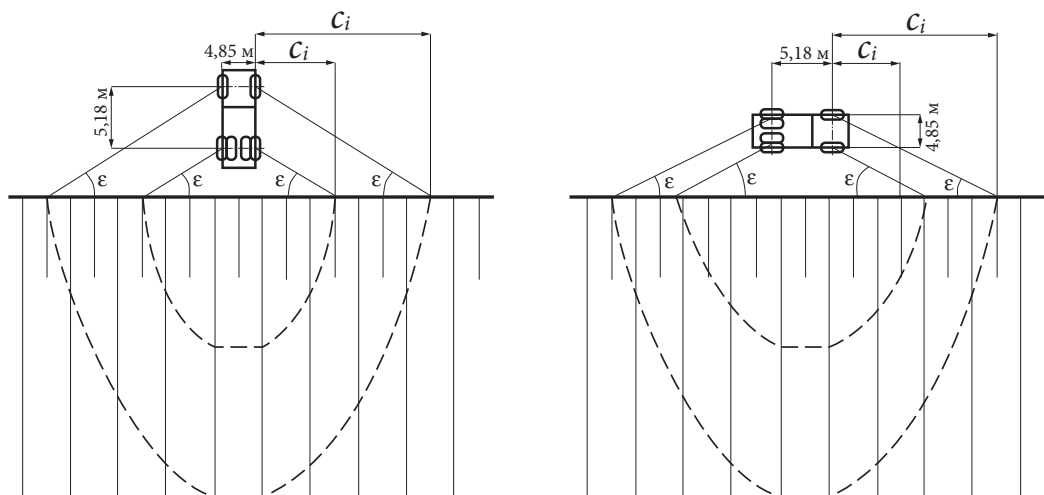

Рис. 3. Схема расчета влияния веса самосвала с грузом на уступ

Fig. 3. Pattern of calculation of the dump truck loaded weight effect on the bench

Расчёты устойчивости откосов уступов высотой 24,0 м и ширины призмы обрушения под воздействием веса гружёного автосамосвала, расположенного на расстоянии 3,5 м от бровки откоса вдоль колеи, показали (рис. 4), что:

- на 1 п. м протяженности откоса нагрузка от веса самосвала составит 25,08 т/п. м, или 245,7 кН/п. м;
- вдоль колеи, удаленной от кромки откоса (на расстоянии $3,5 + 4,85 = 8,35$ м), нагрузка составит 15,81 т/п. м, или 155 кН/п. м, при этом расчетное значение ширины призмы обрушения увеличится до 5 м.

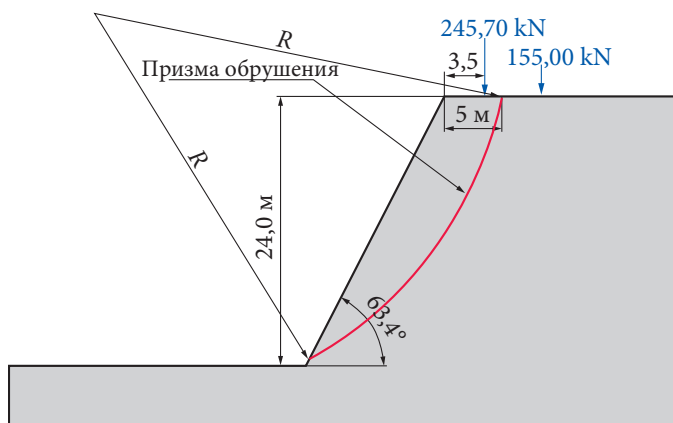


Рис. 4. Определение устойчивости откосов уступов и ширины призмы обрушения под воздействием веса гружёного автосамосвала, расположенного на расстоянии 3,5 м от бровки откоса

Fig. 4. Determination of the bench slope stability and the sliding wedge width under the influence of dump truck loaded weight located at a distance of 3.5 m from the slope edge

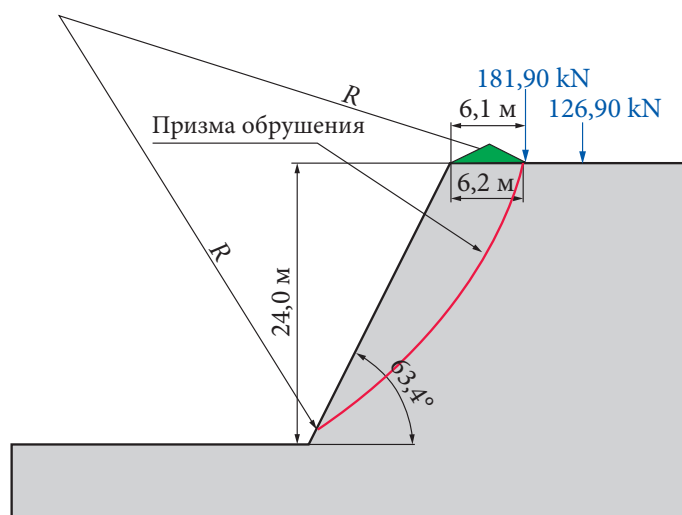


Рис. 5. Определение устойчивости откосов уступов и ширины призмы обрушения в зависимости от веса гружёного автосамосвала, расположенного на расстоянии 6,4 м от бровки откоса, находящегося за пределами вала безопасности

Fig. 5. Determination of the bench slope stability and the sliding wedge width under the influence of dump truck loaded weight located at a distance of 6.4 m from the slope edge outside the safety windrow

Определение устойчивости откосов уступов высотой 24,0 м и ширины призмы обрушения в зависимости от веса гружёного автосамосвала Cat 785С, расположенного на расстоянии 6,4 м от бровки откоса, находящегося за пределами вала безопасности, показало (рис. 5), что:

- нагрузка вдоль колеи составит 18,56 т/п. м, или 181,9 кН/п. м;
- нагрузка вдоль колеи, удаленной от кромки откоса на расстояние $6,4 + 4,85 = 11,25$ м, составит 12,95 т/п. м, или 126,9 кН/п. м, при этом расчетное значение ширины призмы обрушения увеличилось до 6,2 м;
- окончательно значение ширины призмы возможного обрушения с учетом нагрузки от самосвала Cat 785С принимается равным 6,2 м.

Результаты расчетов устойчивости откосов отвалов [18, 20, 21] при ширине призмы обрушения размером 5,1 м (рис. 6) при размещении на них гружёного автосамосвала показали:

- нагрузка задней оси, расположенной на расстоянии, равном ширине призмы обрушения 5,1 м, с весом задней оси автосамосвала, приходящимся на 1 п. м протяженности откоса вдоль бровки (рис. 6 и формула (4)), составит 15,18 т/п. м, или 148,7 кН/п. м;
- нагрузка передней оси, расположенной на расстоянии $5,1 + 5,18 = 10,28$ м от кромки отвала, составит 5,82 т/п. м, или 57 кН/п. м;
- параметры вала безопасности на отвале принимаются в соответствии с едиными правилами безопасности, применяемыми при разработке месторождений полезных ископаемых открытым способом, и равны: высота – 1,5 м; ширина (откосы 1:2) – 6 м.

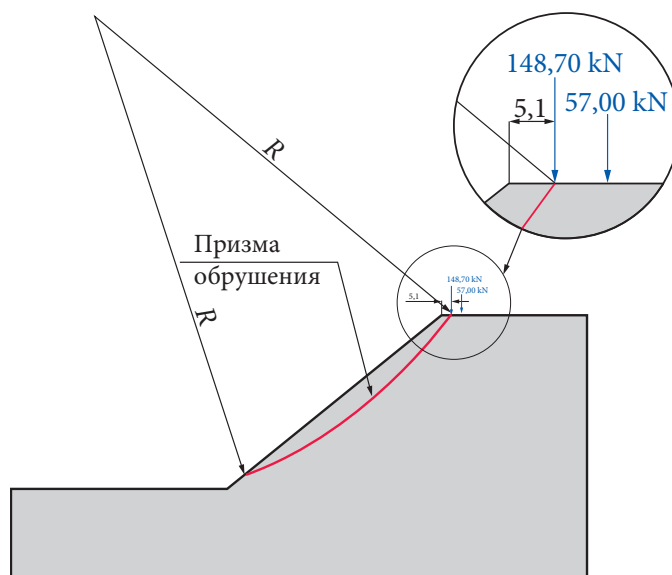


Рис. 6. Определение устойчивости откосов отвалов и ширины призмы обрушения в зависимости от веса гружёного автосамосвала, расположенного на расстоянии 5,1 м от бровки откоса отвала

Fig. 6. Determination of the dump slope stability and the sliding wedge width under the influence of dump truck loaded weight located at a distance of 5.1 m from the dump slope edge



Выводы

Расчёты, проводимые в соответствии с методическими указаниями ВНИМИ и СНиП 2.05.07-91, показали:

– маркшейдерское обеспечение работ для безопасного ведения горных работ при добыче полезного ископаемого открытым способом, будет настолько эффективно, насколько точно и правильно будут проводиться работы по контролю за физико-механическим состоянием горных пород как на добычных участках, так и на участках транспортировки полезного ископаемого;

– определение устойчивости откосов уступов и ширины призмы обрушения, выполненные аналитическим методом, дает более высокие результаты точности, чем полученные графическим методом;

– устойчивость откосов уступов и ширина призмы обрушения зависят не только от физико-механического состояния горных пород, но также от высоты уступа, веса автосамосвала и его груза, приходящегося на 1 п. м площадки размещения, расстояния от бровки откоса и других факторов;

– массив горных пород находится в спокойном состоянии, не подвержен оползневым явлениям, до тех пор, пока суммы удерживающих сил больше или равны суммедвигающих;

– при использовании на открытых горных работах крупногабаритного транспортного оборудования нестандартного веса необходимо производить расчеты безопасной ширины призм обрушения с учетом нагрузок от них из расчета на 1 п. м, величины которых могут быть в 1,5–2,0 раза выше расчетных по кругло-цилиндрической поверхности скольжения.

Список литературы

1. Гордеев В. А. Сравнительный анализ расчетных поверхностей скольжения в однородных откосах. Маркшейдерское дело и геодезия. В: *Методы и результаты: межвуз. сб. науч. тр. СПбГИ. СПб.*; 1999. С. 17–21.
2. Инструкция по производству маркшейдерских работ. Утв. Госгортехнадзором СССР 20 февр. 1985 г. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200026592>
3. Hoek E. *Practical Rock Engineering*. URL: <https://www.rocksolid.com/assets/resources/learning/hoek/Practical-Rock-Engineering-Full-Text.pdf>
4. Liu Y., Wang X., Gao J. Stability Analysis and Reinforcement Treatment of Open Pit Slope. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019;283(1):012009. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/283/1/012009>
5. Liu J., Zhao X.-D., Lu Z.-X. Mining scheme optimization and slope stability analysis for transition from open pit to underground mining. *Dongbei Daxue Xuebao. Journal of Northeastern University*. 2013;34(9):1327–1329+1334.
6. Chen J., Li K., Chang K.-J., Sofia G., Tarolli P. Open-pit mining geomorphic feature characterization. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2015;42:76–86. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2015.05.001>
7. Ding D., Niu L. Stability analysis and treatment schemes for high and steep slope in bayan obo iron mine. *International Journal of Simulation: Systems, Science and Technology*. 2016;17(42):13.1–13.4. <https://doi.org/10.5013/IJSSST.a.17.42.13>
8. Han L., Shu J., Zhou W., Meng Q. Research on mechanical and geometric characteristics of concave end- slope in open-pit mine with mining by areas. *Huazhong Keji Daxue Xuebao (Ziran Kexue Ban). Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*. 2014;42(3):82–86. <https://doi.org/10.13245/j.hust.140318>
9. Певзнер М. Е., Иофис М. А., Попов В. Н. *Геомеханика*. М.: МГТУ; 2005. 438 с.
10. Галустьян Э. Л. *Управление геомеханическими процессами в карьерах*. М.; 1980. 206 с.
11. Chukin B. A., Chukin R. B. Probability assessment of pit wall stability in jointed rock mass. *Gornyi Zhurnal*. 2019;(5):36–41. <https://doi.org/10.17580/gzh.2019.05.06>
12. Besimbaeva O. G., Khmyrova E. N., Nizametdinov F. K., Oleinikova E. A. Assessment and Prediction of Slope Stability in the Kentobe Open Pit Mine. *Journal of Mining Science*. 2018;54(6):988–994. <https://doi.org/10.1134/S1062739118065143>
13. Avetisyan I. M., Semenova I. E. Forecast of rock mass stability under industrial open pit mine facilities during the open pit deepening. A case study of the Zhelezny open pit, JSC Kovdorsky GOK. In: Litvinenko V. (ed.) *EUROCK2018: Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses*. 1st ed. London: CRC Press; 2018. P. 755–760.
14. Дунаев В. А., Годовников Н. А. Оценка и прогноз устойчивости уступов карьеров в массивах скальных пород на основе геоинформационных технологий. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2014;(4):134–137.
15. Левкин Ю. М. Применение современных геодезических приборов в горном деле. В кн.: *Geospatial technologies and Earth resources (GTER 2017): материалы Международной конференции по геопрограммным технологиям и ресурсов Земли*. Ханой; 2017. С. 307–311.
16. Казикаев Д. М., Козырев А. А., Каспарьян Э. В., Иофис М. А. *Управление геомеханическими процессами при разработке месторождений полезных ископаемых*. М.: Горная книга; 2016. 490 с.
17. Певзнер М. Е. *Борьба с деформациями горных пород на карьерах*. М.: Недра; 1978.



18. Жумабаев Б., Чунуев И. К., Дуйшеналиев Ж. М. Отвалообразование на наклонной поверхности ледника. Современные концептуальные положения в механике горных пород. В кн.: *Методы и результаты: труды международной конференции «Илим»*. Бишкек; 2002. С. 81–92.
19. Фисенко Г. Л., Сапожников В. Т., Мочалов А. М. и др. *Методические указания по определению углов наклона бортов, откосов уступов и отвалов строящихся и эксплуатируемых карьеров*. Л.: ВНИМИ; 1972. 166 с.
20. Чунуев И. К., Умаров Т. С. Опыт внедрения современных компьютерных программ в учебный процесс и на горных предприятиях. *Горный журнал*. 2016;(8):84–88.
21. Чунуев И. К., Дуйшеналиев Ж. М. Проблемы и перспективы добычи золота на месторождении «Кумтор». *Горный журнал*. 2011;(11):68–74.
22. *Правила обеспечения устойчивости откосов на угольных разрезах*. Минтопэнерго РФ. Научно-исследовательский институт горно-геомеханического и маркшейдерского дела. Межотраслевой научный центр «ВНИМИ». СПб.; 1998.
23. Проект приказа Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору РФ «Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности “Правила обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов”».
24. Фисенко Г. Л. *Устойчивость бортов карьеров и отвалов*. 2-е изд. М.: Недра; 1965. 378 с.
25. Coulomb C. A. Essai sur une application des règles des maximis et minimis à quelques problèmes de statique relatifs à l'architecture. *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences*. 1776;7:343–387.
26. On the Mathematical Theory of the Stability of Earthwork and Masonry. In: *a Letter to Prof. Stokes, Sec. R.S. By W. J. Macquorn Rankine, Esq., C.E., F.R.S., Professor of Civil Engineering in the University of Glasgow*. Received February 19; 1856. <https://doi.org/10.1098/rspl.1856.0019>
27. Курдюмов В. И. *Краткий курс оснований и фундаментов*. 3-е изд. Петроград: Г.В. Гольстен; 1916. 292 с.
28. Соколовский В. В. *Статика сыпучей среды*. М.: Физматгиз; 1960. 243 с.
29. Авершин С. Г. *Сдвигение горных пород при подземных разработках*. М.: Углетехиздат; 1947. 245 с.
30. Протоцкая М. М. *Давление горных пород и рудничное крепление*. 2-е изд. М.; Л.: Огиз – Гос. науч.-техн. изд-во; 1931. 104 с.
31. Руппенейт К. В. *Некоторые вопросы механики горных пород*. М.: Углетехиздат; 1954. 384 с.

References

1. Gordeev V. A. Comparative analysis of design sliding surfaces in homogeneous slopes. Mine surveying and geodesy. In: *Methods and Findings: interuniversity collection of research papers of SPbGGI*. St. Petersburg; 1999, pp. 17–21 (in Russ.)
2. *Instructions for mine surveying*. Approved by the USSR Gosgortekhnadzor; 1985. (In Russ.). URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200026592>
3. Hoek E. *Practical Rock Engineering*. URL: <https://www.rocscience.com/assets/resources/learning/hoek/Practical-Rock-Engineering-Full-Text.pdf>
4. Liu Y., Wang X., Gao J. Stability Analysis and Reinforcement Treatment of Open Pit Slope. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019;283(1):012009. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/283/1/012009>
5. Liu J., Zhao X.-D., Lu Z.-X. Mining scheme optimization and slope stability analysis for transition from open pit to underground mining. *Dongbei Daxue Xuebao. Journal of Northeastern University*. 2013;34(9):1327–1329+1334.
6. Chen J., Li K., Chang K.-J., Sofia G., Tarolli P. Open-pit mining geomorphic feature characterization. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2015;42:76–86. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2015.05.001>
7. Ding D., Niu L. Stability analysis and treatment schemes for high and steep slope in bayan obo iron mine. *International Journal of Simulation: Systems, Science and Technology*. 2016;17(42):13.1–13.4. <https://doi.org/10.5013/IJSSST.a.17.42.13>
8. Han L., Shu J., Zhou W., Meng Q. Research on mechanical and geometric characteristics of concave end- slope in open-pit mine with mining by areas. *Huazhong Keji Daxue Xuebao (Ziran Kexue Ban). Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*. 2014;42(3):82–86. <https://doi.org/10.13245/j.hust.140318>
9. Pevzner M. E., Iofis M. A., Popov V. N. *Geomechanics*. Moscow: MGGU Publ. House; 2005. 438 p. (In Russ.).
10. Galust'yan E. L. *Geomechanical processes control in open pits*. Moscow; 1980. 206 p. (in Russ.).
11. Chukin B. A., Chukin R. B. Probability assessment of pit wall stability in jointed rock mass. *Gornyi Zhurnal*. 2019;(5):36–41. <https://doi.org/10.17580/gzh.2019.05.06>
12. Besimbaeva O. G., Khmyrova E. N., Nizametdinov F. K., Oleinikova E. A. Assessment and Prediction of Slope Stability in the Kentobe Open Pit Mine. *Journal of Mining Science*. 2018;54(6):988–994. <https://doi.org/10.1134/S1062739118065143>
13. Avetisian I. M., Semenova I. E. Forecast of rock mass stability under industrial open pit mine facilities during the open pit deepening. A case study of the Zhelezny open pit, JSC Kovdorsky GOK. In: Litvinenko V. (ed.) *EUROCK2018: Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses*. 1st ed. London: CRC Press; 2018. P. 755–760.



14. Dunaev V. A., Godovnikov N. A. The estimation and forecast of the open pit ledges stability in the rock massif on a basis geoinformation technologies. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2014;(4):134–137. (In Russ.).
15. Levkin Yu. M. Application of up-to-date geodetic instruments in mining. Collection of research papers: "Geo-spatial technologies and Earth resources (GTER 2017)". In: *International Conference on Geospatial Techniques and Earth Resources*. Hanoi; 2017, pp. 307–311. (In Russ.).
16. Kazikaev D. M., Kozzyrev A. A., Kasparyan E. V., Iofis M. A. *Control of geomechanical processes in mineral deposit development: Tutorial*. Moscow: Gornaya Kniga; 2016, 490 p. (In Russ.).
17. Pevzner M.E. *Rock Deformation Prevention at Open Pits*. Moscow: Nedra; 1978. (In Russ.).
18. Zhumabaev B., Chunuev I.K., Duishenaliev Zh.M. Dumping on inclined glacier surface. The latest conceptual postulates in rock mechanics. In: *Methods and Findings: Proceedings of the international conference "Ilim"*. Bishkek; 2002, pp. 81–92. (In Russ.).
19. Fisenko G.L., Sapozhnikov V.T., Mochalov A.M. et al. *Methodical instructions for determining the slope angles of open pit walls, benches and dumps (under construction and in operation)*. Leningrad: VNIMI; 1972. 166 p. (In Russ.).
20. Chunuev I.K., Umarov T. S. Experience in the implementation of advanced computer programs in the educational process and at mining enterprises. *Gornyi zhurnal*. 2016;(8):84–88. (In Russ.).
21. Chunuev I.K., Duishenaliev Zh.M. Problems and prospects of gold production at the Kumtor deposit. *Gornyi zhurnal*. 2011;(11):68–74. (In Russ.).
22. *Regulations for ensuring slope stability at open-pit coal mines*. Ministry of Fuel and Energy of the Russian Federation. Mining and Geotechnical Engineering and Mine Surveying Research Institute. Interdisciplinary Scientific Center "VNIMI". St. Petersburg, 1998. (In Russ.).
23. Draft order of the Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision of the Russian Federation "On the approval of the Federal regulations in the field of industrial safety 'Regulations for ensuring slope stability of open pits, open-pit coal mines and dumps'". (In Russ.).
24. Fisenko G. L. *Slope Stability of Pit Walls and Dumps*. 2nd ed. Moscow: Nedra; 1965. 378 p. (In Russ.).
25. Coulomb C. A. Essai sur une application des règles des maximis et minimis à quelques problèmes de statique relatifs à l'architecture. *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences*. 1776;7:343–387.
26. On the Mathematical Theory of the Stability of Earthwork and Masonry. In: *a Letter to Prof. Stokes, Sec. R.S. By W. J. Macquorn Rankine, Esq., C.E., F.R.S., Professor of Civil Engineering in the University of Glasgow*. Received February 19, 1856. <https://doi.org/10.1098/rspl.1856.0019>
27. Kurdyumov V. I. *Foundation Engineering Short Course*. 3rd ed. Petrograd: G.V. Golsten; 1916. 292 p. (In Russ.).
28. Sokolovsky V. V. *Loose Medium Statics*. Moscow: Fizmatgiz; 1960. 243 p. (In Russ.).
29. Avershin S. G. *Rock Shear in Underground Mining*. Moscow: Ugletekhizdat; 1947. 245 p. (In Russ.).
30. Protodyakonov M. M. *Rock Pressure and Mine Support*. 2nd ed. Moscow; Leningrad: Ogiz; 1931. 104 p. (In Russ.).
31. Ruppeneit K.V. *Some topics of rock mechanics*. Moscow: Ugletekhizdat; 1954. 384 p. (In Russ.).

Информация об авторах

Ишимбай Карыбаевич Чунуев – зав. кафедрой, проф. Кыргызского государственного университета геологии, горного дела и освоения природных ресурсов им. академика У.А. Асаналиева (КГТУ), Председатель Правления Кыргызского Союза маркшейдеров, Президент Кыргызской горной ассоциации, г. Бишкек, Киргизия; ORCID: [0000-0001-7952-543X](https://orcid.org/0000-0001-7952-543X); SCOPUS ID: [6507330670](https://orcid.org/6507330670); e-mail: Ichunuev@gmail.com

Юрий Михайлович Левкин – д.т.н., проф., член Союза маркшейдеров России, г. Москва, Россия; e-mail: lev5353@bk.ru

Жусуп Болотбеков – аспирант, Кыргызский государственный университет геологии, горного дела и освоения природных ресурсов им. акад. У.А. Асаналиева (КГТУ), г. Бишкек, Киргизия; e-mail: Lawcast_kigga@mail.ru

Information about the authors

Ishimbay K. Chunuev – Head of Department, Professor Kyrgyz State University of Geology, Mining and Natural Resources Development named after academician U. A. Asanaliyev (KGGU), Chairman of the Board of the Kyrgyz Union of Surveyors, the President Kyrgyz Mining Association, Bishkek, Kyrgyzstan; ORCID: [0000-0001-7952-543X](https://orcid.org/0000-0001-7952-543X); SCOPUS ID: [6507330670](https://orcid.org/6507330670); e-mail: Ichunuev@gmail.com

Yuri M. Levkin – Dr. Sci. (Eng.), Member of the Union of Surveyors of Russia, Moscow, Russian Federation; e-mail: lev5353@bk.ru

Zhusup Bolotbekov – PhD student, Kyrgyz State University of Geology, Mining and Natural Resources Development named after academician U. A. Asanaliyev (KGGU), Bishkek, Kyrgyzstan; e-mail: Lawcast_kigga@mail.ru

Поступила в редакцию 31.10.2020

Поступила после рецензирования 01.02.2021

Принята к публикации 05.02.2021

Received 31.10.2020

Revised 01.02.2021

Accepted 05.02.2021



РАЗРАБОТКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-1-42-51>**Методы и технические решения повышения надежности удержания трассы геотехнологической скважины****Д. Н. Молдаши**

АО «Волковгеология» (НАК «Казатомпром»), г. Алматы, Республика Казахстан

✉ priemnaya@vg.kazatomprom.kz**Аннотация**

С увеличением глубины разведочных и технологических скважин при малых диаметрах бурения многократно возрастает вероятность отклонения трассы скважин от заданной траектории, т.е. происходит искривление трассы скважины по зениту и отклонение по азимуту. Поэтому применение способов удержания трассы скважины по вертикали при бурении более глубоких горизонтов рудных тел – вопрос очень актуальный. В работе представлены результаты разработки новой компоновки низа буровой колонны для бурения скважин в мягких горных породах с использованием винтовых центраторов, позволяющих обеспечить хорошие стабилизирующие и центрирующие воздействия, необходимые для уменьшения горизонтального смещения оси скважины от заданного направления, и уменьшение искривления трассы скважины по вертикали (зенитного угла) при сохранении достаточной гибкости буровой колонны. Разработанные технические решения отличаются простой конструкции и возможностью адаптации к широкому диапазону горно-геологических и технологических условий бурения. Обоснованы возможность изготовления центраторов собственными производственными мощностями и технологическая возможность быстрого и легкого соединения с другими элементами низа буровой колонны. Эффективность производства доказана использованием в армировке центраторов недорогих по стоимости и износостойких материалов, в качестве которых были применены твердосплавные вольфрам-кобальтовые или титан-кобальтовые вставки. Кроме того, преобладающий объем бурения скважин в мягких горных породах позволил предусмотреть использование сменных центрирующих элементов, а также возможность ремонта и реставрации для увеличения срока службы, производственного ресурса и повторной эксплуатации. Изготовленный центратор имеет низкую себестоимость производства за счет простоты конструкции и применения недорогого износостойкого материала и составит достойную конкуренцию на рынке буровых инструментов и технических средств для стабилизации бурильной колонны. Экономический эффект от внедрения центраторов собственного производства на 1 (одну) скважину составил более 170 000 тенге.

Ключевые слова

горные породы, бурение, разведочные скважины, технологические скважины, добыча урана, Казахстан

Для цитирования

Молдаши Д. Н. Методы и технические решения повышения надежности удержания трассы геотехнологической скважины. *Горные науки и технологии*. 2021;6(1):42–51. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-1-42-51>

MINERAL RESOURCES EXPLOITATION

Research article

Methods and technical solutions for keeping the path of a geotechnological borehole**D. N. Moldashi**

Volkovgeologia JSC (NAC Kazatomprom), Almaty, the Republic of Kazakhstan

✉ priemnaya@vg.kazatomprom.kz**Abstract**

With increasing depth of exploration and process boreholes (at small drilling diameters), the probability of deviation of the borehole path from design trajectory increases many times; i. e. zenith curvature and azimuth deviation of the borehole path occur. Therefore, developing methods for keeping vertical path of the borehole when drilling deeper horizons of ore bodies is a very topical issue. The paper presents the results of developing a new bottom-hole assembly for drilling boreholes in soft rocks using screw



casing centralizers, which provide good stabilizing and centering effects to mitigate horizontal departure of the hole axis from the design direction and minimize vertical curvature of the hole path (zenith angle) while maintaining sufficient drill string flexibility. The developed technical solutions provide simplicity of design and ability to adapt to wide range of mining, geological and technological drilling conditions. The feasibility of manufacturing the centralizers by own efforts and the technological feasibility of quick and easy connecting the centralizer with other elements of the bottom-hole assembly have been substantiated. The manufacture efficiency is proved by the use of inexpensive and wear-resistant materials in the centralizer armouring, for which tungsten-cobalt or titanium-cobalt hard-alloy inserts were used. In addition, prevailing volume of borehole drilling in soft rocks allowed using replaceable centering elements, as well as their repair and restoration to increase their service life. The manufactured centralizer has a low production cost due to the design simplicity and the use of inexpensive wear-resistant material and will compete in the market of drilling tools and technical devices for drill string stabilization. The economic effect from the introduction of the self-produced centralizers amounted to more than 170,000 tenge per a borehole.

Key words

rocks, drilling, exploration borehole, technological borehole, uranium mining, Kazakhstan

For citation

Moldashi D. N. Methods and technical solutions for keeping the path of a geotechnological borehole. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021;6(1):42–51. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-1-42-51>

Введение

АО «Волковгеология» как современная эффективная и передовая компания в геологоразведочной отрасли – постоянно проводит разработку и внедрение новых типов буровой техники и технологий. В рамках инновационной деятельности разработаны и внедрены усовершенствованные установки освоения скважин, оснащенные новыми типами технологического инструмента и приспособлений, такими как струйные аппараты и гидроимпульсные системы с применением полимерных растворов для бурения технологических и разведочных скважин. Изобретены и внедрены в производство бентонитовые гильзы, заменившие классическую гидроизоляцию затрубного пространства с использованием цемента, и обеспечивающие высокое качество гидроизоляции и значительное сокращение затрат различные типы фильтров и гравий-гильз. Разрабатываются и внедряются современные типы породоразрушающих инструментов нового поколения.

Увеличение темпов буровых работ, наращивание объемов бурения в условиях жесткой конкурентной среды на рынке услуг по бурению в АО «НАК «Казатомпром» ставят перед буровой и геологической службой АО «Волковгеология» сложные задачи по сохранению лидирующих позиций по обеспечению высоких темпов буровых и геологоразведочных работ. На сегодняшний день АО «Волковгеология» осуществляет полный комплекс геологоразведочных работ высокого качества на все виды твердых полезных ископаемых в соответствии с мировыми стандартами.

АО «Волковгеология» занимает лидирующие позиции в отрасли по объему геологоразведочных работ, объему бурения и по количеству парка буровых установок не только в Казахстане, но и во всем СНГ. За последние пять лет деятельности компанией выполнен колоссальный объем геологоразведочных работ, пробурено 16 млн 66 тыс. пог. м технологических и разведочных скважин [1].

Общая характеристика скважин, используемых на рудниках подземного скважинного выщелачивания урана

Подземное скважинное выщелачивание – это сложный физико-химический процесс, протекающий в геологической среде. Динамика этого процесса, его особенности определяются фациально-литологическими свойствами рудовмещающих горизонтов, руд и всего разреза в целом. При подземном выщелачивании проницаемых рудных тел месторождение вскрывается системой технологических скважин, располагаемых (в плане) рядами, многоугольниками, кольцами [2–6]. В закачные скважины подают растворитель, который, фильтруясь по пласту, выщелачивает полезные компоненты. Продуктивный раствор откачивается через другие (откачные) скважины. Для поисков и разведки месторождений урана в соответствии с проектными решениями бурится комплекс поисковых и разведочных скважин. Разведочные скважины бурятся на всех стадиях геологоразведочных работ – от поисковых до эксплуатационно-разведочных. Для добычи уранового сырья методом ПСВ по всей площади месторождения проводятся горно-подготовительные работы, включающие бурение скважин, различающихся своим назначением. Технологические скважины предназначены для подачи в недра рабочих растворов, закачные (нагнетательные) – для подъема технологических растворов на поверхность, откачные (разгрузочные) обеспечивают выполнение ещё одной важнейшей функции – через них осуществляется регулирование гидродинамического режима в продуктивном пласте, определяющего пути и скорости фильтрации рабочих растворов [7–11].

АО «Волковгеология» на всех месторождениях урана также бурит гидрогеологические, барражные, контрольные, эколого-мониторинговые и наблюдательные скважины. В процессе ПСВ буровые скважины выполняют широкий комплекс различного рода функций: геологическая разведка; вскрытие и подготовка запасов; отработка запасов; управление дви-



жением технологических растворов в продуктивной толще путем создания в эксплуатационном блоке гидродинамической обстановки, обеспечивающей формирование такой структуры фильтрационного потока растворов, которая в максимальной степени благоприятствовала бы течению физико-химических процессов ПСВ; контроль количества и качества откачиваемых и закачиваемых растворов, создание противofильтрационных завес; контроль гидродинамических и физико-химических параметров ведения процесса ПСВ; контроль полноты извлечения урана из руд; охрана окружающей среды от возможного физико-химического загрязнения [12].

Геологический анализ продуктивных горизонтов, регламентов бурения и факторов, влияющих на искривление трассы скважины

Геологический разрез поисковых площадей и месторождений урана представлен горными породами осадочного комплекса – от четвертичных, неогеновых, палеогеновых до меловых отложений. В литологическом плане разрез представлен «наносами» – горизонтально или пологозалегающими перемежающимися осадочными толщами – песками разной зернистости, глинами с прослоями алевроитов, алевролитов, песчаников, гипсов, известняков и других прослоев осадочных горных пород. Горные породы месторождений относятся к II–VII категории по буримости, средняя категория пород по буримости IV [13].

Месторождения урана Шу-Сарысуйской и Сырдарьинской уранорудных провинций относятся к гидрогенному пластово-инфильтрационному типу. Продуктивные (рудные) горизонты чаще всего состоят из неоднородными песчаными толщами – от тонко- и среднезернистых до крупнозернистых песков, с включением глинистых частиц и карбонатных обломков коренных горных пород (известняки, алевролиты, алевроиты, гипсы и т.п.). Все продуктивные горизонты повсеместно обводнены. Продуктивные горизонты имеют горизонтальное или пологонаклонное залегание. С учетом пространственного расположения продуктивных горизонтов все скважины бурятся вертикально. Разведочные скважины бурятся вертикально с целью определения истинной мощности рудных горизонтов, что очень важно для точного подсчета запасов руды в продуктивном горизонте и в целом на месторождении. Соответственно, технологические скважины бурятся также вертикально с целью вскрытия, подготовки и отработки запасов. Бурение производится в соответствии с утвержденными заказчиком (уранодобывающими предприятиями) регламентами бурения и сооружения технологических скважин, которыми предусмотрено бурение вертикальных скважин, с допустимыми отклонениями трассы скважины не более 1 % на каждые 100 м. Бурение скважин ведется отработанными технологическими режимами, адаптированными к горно-геологическим условиям. С увеличением глубины разведочных и технологических скважин при малых диаметрах бурения неоднократно возрастает вероятность от-

клонения трассы скважин от заданной траектории, т.е. происходит искривление трассы скважины по зениту и отклонение по азимуту. Поэтому применение способов удержания трассы скважины по вертикали при бурении более глубоких горизонтов рудных тел – вопрос очень актуальный. Для обеспечения вертикальности скважин при бурении по «наносам» – горным породам осадочного комплекса II–V категории по буримости с прослоями коренных горных пород VI–VII категории по буримости применяется следующая компоновка низа бурильной колонны (КНБК) – утяжеленные бурильные трубы (УБТ) различного диаметра и длины. Как правило, КНБК составляют из УБТ Ø63 мм, УБТ Ø73 мм, УБТ Ø89 мм и УБТ Ø112 мм, расположенных последовательно над породоразрушающим инструментом (шарошечным долотом или долотом PDC). *Практически при искривлении скважин происходит совместное изменение зенитных и азимутальных углов, что вызывает пространственное или общее искривление.* В процессе бурения преобладающее большинство скважин искривляется. Искривления многих скважин имеют достаточно стабильный, постоянно повторяющийся характер. Из-за непостоянства физико-механических, структурных и других свойств горных пород и их углов наклонов или углов встречи со скважиной (геологические факторы) и технологических режимов их бурения, состава КНБК, колонковых наборов, породоразрушающего инструмента и т.п. (технологические факторы) и действующих раздельно или совместно – происходит искривление скважин. При бурении вертикальных скважин ключевой целью является предотвращение возможности искривления ствола, а в случае искривления – возможность исправления и приведения ствола к вертикали. Подобные задачи решаются за счет использования так называемого эффекта маятника: увеличивая интенсивность фрезеровки стенки ствола боковой поверхностью породоразрушающего инструмента, на нем одновременно создают максимально возможную отклоняющую силу, которая направлена в противоположную сторону относительно искривления ствола. Кроме того, стабилизация несущественного показателя зенитного угла скважины может обеспечиваться и за счет оптимального центрирования нижней части компоновки низа бурильной колонны (КНБК), которая в свою очередь обеспечивается посредством выбора необходимого расстояния для размещения опорно-центрирующих элементов от породоразрушающего инструмента. Уменьшение показателя искривления может достигаться за счет изменения направления оси породоразрушающего инструмента или отклоняющей силы. Виды компоновки низа бурильной колонны для создания вертикальных скважин включают маятниковые, жесткие и ступенчатые компоновки. Основным средством предупреждения искривления вертикальных скважин является правильная конструкция КНБК, определяемая осевой нагрузкой на долото, диаметром и глубиной скважины, геологическими условиями, физико-механическими свойствами горных пород, допустимым зенитным углом и другими факторами [14–16].



Обзор методов предупреждения искривления скважин и технических средств для стабилизации бурильной колонны

В последние годы значительно расширилась добыча многих полезных ископаемых с помощью геотехнологических скважин. Скважинная технология добычи позволяет в ряде случаев снизить в 2–4 раза капитальные затраты на строительство предприятий, повысить производительность труда, сохранить численность работающего персонала [17–21].

В Казахстане огромные запасы уранового сырья связаны с водоносными горизонтами, расположенными в южных регионах республики. Добыча урана осуществляется методом подземного выщелачивания с помощью закачных и откачных геотехнологических скважин [22–25]. Технология сооружения геотехнологических скважин, хотя и имеет общие черты с техникой и технологией бурения гидрогеологических скважин, тем не менее имеет много важных особенностей.

На сегодняшний день различные направления отечественных и зарубежных исследований посвящены разработке технологии сооружения геотехнологических скважин, определению геолого-технических условий месторождений, выбору способа и соответствующего бурового оборудования. Рассмотрены многие аспекты технологии создания фильтровой части скважины и гидроизоляции продуктивного горизонта от выше- и нижележащих пластов, а также вопросы освоения геотехнологических скважин [26–29].

В геологических условиях бурения скважин АО «Волковгеология» наиболее распространены методы предупреждения искривления скважин: снижение осевой нагрузки на долото; периодическое использование средств искусственного искривления; бурение вертикального пилот-ствола жесткими КНБК и последующее его расширение; бурение жесткими КНБК; бурение КНБК с максимально приближенным к долоту центром тяжести.

Метод снижения осевой нагрузки на долото позволяет проводить скважины в горных породах с часто перемежающимися осадочными толщами различной категорией буримости с небольшими искривлениями. АО «Волковгеология» для снижения искривления трассы скважин по зениту и отклонения направления скважин по азимуту применяла в составе КНБК различные технические средства для центрации и стабилизации бурильной колонны в процессе бурения, такие как центраторы и стабилизаторы [30, 31]. Устройство устанавливается в колонне бурильных труб над УБТ. Центраторы различных конструкций применялись от разных производителей (Украина, г. Дрогобыч Львовской обл; РФ, г. Люберцы Московской обл. и г. Уфа). Применение центраторов разных производителей дало положительный эффект – искривления и отклонения скважин удалось значительно снизить. По данным инклинометрии использование центраторов позволило сократить отклонения скважин до 5–7 м,

что допустимо регламентами бурения. Однако ряд факторов, таких как высокая стоимость (стоимость одного центратора составляла 580 тыс. руб), громоздкая конструкция (длина 2,4 м), а также большой вес (более 120 кг) центраторов, не позволил повсеместно их применять в АО «Волковгеология». Высокая стоимость центраторов от производителей из РФ и Украины обусловлена тем, что в конструкции для центрирования и боковой фрезеровки ствола скважины используются режущие насадки из искусственных поликристаллических технических алмазов – вставки PDC. Как правило, насадки PDC используются при бурении и центрации ствола скважин на нефть в твердых и крепких коренных горных породах VII–XII категории буримости. Кроме этого, вес каждого центратора составляет более 120 кг, что затрудняло физически их компоновку в КНБК. Высокая стоимость этих центраторов в свою очередь повышает себестоимость бурения скважин.

Формирование критериев оценки конструкции центрирующих элементов

В связи с высокой стоимостью и громоздкостью центраторов производства заводов-изготовителей РФ и Украины перед технологической службой и конструкторами, руководством АО «Волковгеология» была поставлена задача – разработать, изготовить и внедрить в производство центраторы собственного производства. Центраторы должны были быть адаптированы для горно-геологических, технических и технологических условий. Разработанные центраторы должны были исключить отклонения трассы скважин, снизить себестоимость буровых работ, повысить производительность труда и сократить непроизводительные затраты и простои. При разработке конструкции и центрирующих элементов центратора специалисты АО «Волковгеология» исходили из следующих критериев: простота конструкции, адаптированная к горно-геологическим и технологическим условиям бурения; возможность изготовления центраторов собственными производственными мощностями на базе АО «Волковгеология»; возможность быстрого и легкого соединения с другими элементами КНБК; использование в армировке центраторов недорогих по стоимости и износостойких материалов – твердосплавные вставки ВК (вольфрам-кобальтовые) или ТК (титан-кобальтовые) вместо дорогостоящих вставок PDC. Кроме того, учитывая, что скважины бурятся в мягких горных породах II–VI категории буримости, необходимо предусмотреть использование сменных центрирующих элементов. Также изготовленный центратор должен иметь низкую стоимость за счет простоты конструкции и применения недорогого износостойкого материала, низкой себестоимости изготовления. Изготовленный АО «Волковгеология» центратор должен быть конкурентоспособным на рынке буровых инструментов и иметь возможность ремонта и реставрации для увеличения срока службы, производственного ресурса и повторной эксплуатации [32–35].

Разработка и внедрение центраторов собственного производства.

Новизна разработок

Руководствуясь данными критериями, конструкторы партии новых технологий бурения (ПНТБ) АО «Волковгеология» разработали и внедрили в производство инновационный тип технических средств – центраторы собственного производства [36]. Для различных горно-геологических условий были изобретены, изготовлены и внедрены в производство новые типы винтовых центраторов. По результатам опытного бурения было определено, что ресурса одного центратора в данных геологических условиях в среднем хватает на 10 скважин. В процессе эксплуатации по мере износа сменных твердосплавных вставок они могут быть заменены путем выкручивания из центратора, а на их место ввинчены новые твердосплавные вставки, и центратор можно эксплуатировать далее, увеличивая срок эксплуатации. Кроме этого, разработана и внедрена новая схема КНБК с использованием центраторов собственного производства.

Новизна разработанных центраторов заключается в следующем. Винтовой центратор бурового инструмента, содержащий соединенную с буровым инструментом конструкцию с центрирующими выступами, армированными износостойким материалом, отличается от уже существующих моделей тем, что соединение его с буровым инструментом выполнено в виде охватывающей бурильную трубу бурового инструмента цанговой системы, в которой упо-

мянутые центрирующие выступы выполнены заодно с цангами или в виде сменных деталей, монтируемых в цангах посредством фигурных шпонок. Кроме того, центратор бурового инструмента, состоящий из трубчатого корпуса, имеющего по концам резьбы для соединительных элементов, включения его в состав опускаемого в скважину бурового инструмента и центральную часть, имеющую по периферии армированные износостойким материалом центрирующие выступы, отличается тем, что центральная часть корпуса между резьбами имеет цилиндрическую резьбу, на которую навинчены сменные диски, отделённые друг от друга втулками и снабжённые центрирующими выступами.

Корпус центратора изготовлен из стали М-45 диаметром 157 мм, а с твёрдым сплавом ВК и ТК (общая длина центратора $L = 1200$ мм, вес – 12 кг). Длина рабочей части $L = 0,3/0,6$ м. Шаг винтовой линии – 1117 мм. С двух концов центратора имеется замковая резьбовая часть 3-76В (рис. 1).

На предприятии проводились испытания центраторов собственного производства нескольких диаметров $\varnothing 127$ мм, $\varnothing 132$ мм, $\varnothing 156$ мм при бурении «пилот-скважины» с нуля до проектной глубины.

Забуривание ствола скважины производилось при объёме подачи промывочной жидкости 190–200 л/мин на пониженных режимах бурения, скорость вращения $n = 86$ об/мин (1-я скорость станка) со следующей компоновкой низа буровой колонны: пикобур $\varnothing 132/141/161$ мм; УБТ $\varnothing 63$ мм – 8 м; ведущая штанга $\varnothing 63$ мм – 8 м.



Рис. 1. Заготовку и готовый винтовой центратор производства АО «Волковгеология»

Fig. 1. Blank part and finished screw centralizer manufactured by JSC Volkovgeologiya

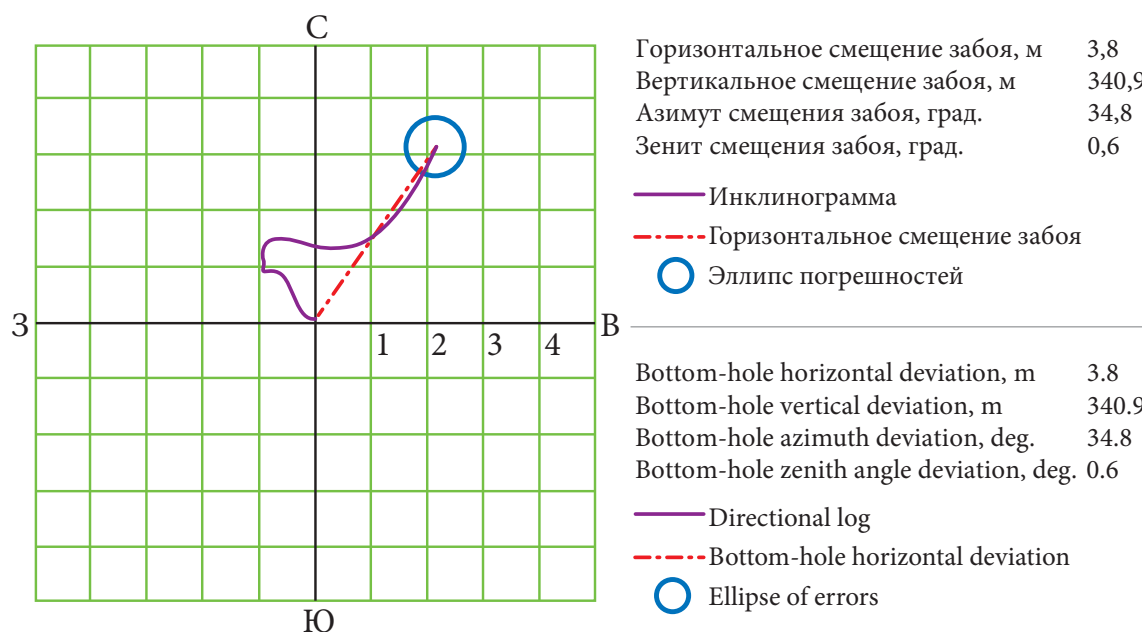


Рис. 2. Инклинограмма скважины, пробуренной с центратором Ø156 мм

Fig. 2. Directional log of a borehole drilled with the Ø156 mm centralizer

С 8 м (длина УБТ) до проектной глубины бурение производилось с центратором Ø127/132/156 мм, со следующей компоновкой низа бурильной колонны: пикобур Ø132/141/161 мм; УБТ Ø 63 мм – 8 м; центратор Ø127/132/156 мм – 0,4 м.

Режим экспериментального бурения: осевая нагрузка $P = 200–600$ кгс; частота вращения $n = 166$ об/мин; расход промывочной жидкости $Q = 190–200$ л/мин. При бурении каждый замер ведущей штанги – 8 м – обязательно прорабатывался не менее 4–5 раз для предотвращения сальникообразования и 2 раза в разнотернистых песках [37, 38].

Результаты испытаний по бурению пилот-скважин с помощью новой компоновки низа буровой колонны отображены в табл. 1 и на рис. 2.

Таблица 1 / Table 1

Сводные данные по бурению пилот-скважин на участке с помощью новой компоновки низа буровой колонны

Summary of drilling pilot holes with new bottom-hole assembly at the wellfield

Диаметр центратора, мм	Средняя проектная глубина, м	Допустимое отклонение, м	Среднее фактическое отклонение от оси, м
127	420,0	4,20	3,30
132	424,2	4,24	3,78
156	340,9	3,40	3,10

Результаты интерпретации, полученные при проведении ГИС на скважинах, удовлетворяют требуемым параметрам, горизонтальное смещение не превышает допустимых норм, скважины допущены к креплению стенок. Таким образом, использование центраторов собственного производства позволило

придать жесткость бурильной колонне, которая необходима для удержания её при бурении в заданном направлении, повысить осевую нагрузку на долото, а также уменьшить трение и износ бурильных труб.

Всего с использованием новых типов центраторов производства АО «Волковгеология» было пробурено 110 скважин. Разработанные центраторы имеют приемлемые оптимальные габариты: длина – 1,2 м, вес – 12–15 кг (в 10 раз легче российских центраторов), что позволяет легко соединять их в КНБК. Стоимость разработанных и изготовленных АО «Волковгеология» центраторов составила 54–58 тыс. тг, что в 10 (десять) раз дешевле центраторов производства заводов России и Украины. Помимо этого, центраторы собственного производства полностью адаптированы к горно-геологическим и технологическим условиям проведения буровых работ в АО «Волковгеология».

Выводы

АО «Волковгеология» является головным предприятием АО «НАК «Казатомпром» по геологическому обеспечению всех направлений его деятельности и проведению технологического бурения для горно-подготовительных работ на уранодобывающих предприятиях компании. Предприятие занимает около 90 % доли рынка буровых работ в АО «НАК Казатомпром», обеспечивает геологическое сопровождение всех видов деятельности – от поиска и разведки урановых месторождений до их ввода в промышленную эксплуатацию. Для добычи уранового сырья уранодобывающие компании применяют наиболее рентабельный и экологически безопасный метод подземного скважинного выщелачивания (ПСВ). Добыча уранового сырья производится через пробуренные технологические (закачные и откачные) скважины.



Разработанные, изготовленные и внедренные в бурении новые типы центраторов в компоновке низа буровой колонны исключают сверхдопустимое отклонение оси скважины от вертикали (зениту), а также по горизонтали (азимуту) и являются успешным решением проблемы по отклонениям в данное время. По данным ГИС (инклинометрии) горизонтальное и вертикальное смещение оси скважин находится в пределах допустимых норм.

Экономический эффект от внедрения центраторов собственного производства на 1 (одну) скважину составил более 170 000 тенге. По статистике сверхнормативные отклонения до внедрения центраторов собственного производства составляли не менее 10 % от общего объема пробуренных скважин в год, а это не менее 700 скважин. Таким образом, общий экономический эффект может составить более 120 млн тенге в год.

Список литературы

1. Ракишев Б. Р., Федоров Б. В. *Техника и технология сооружения геотехнологических скважин*. Алматы; 2013. 260 с.
2. Armstrong D., Jeuken B. Management of In-Situ Recovery (ISR) Mining Fluids in a Closed Aquifer System. In: *Proceedings of the International Mine Water Conference. 19–23 October 2009*. New York: Curran Associates; 2009. P. 688–697.
3. Armstrong D, Jeuken B. Management of in-situ recovery (ISR) mining fluids in a closed aquifer system. In: *Abstracts of the International Mine Water Conference*. South Africa; 2009. P. 703–712.
4. Arnold N., Gufler K. The future of Nuclear Fuel Supply. In: *Proceedings of the 1st INRAG Conference on Nuclear Risk*. 16–17 April 2015. Vienna: University of Natural Resources and Life Sciences in Vienna; 2015. P. 1–27.
5. Benes V., Gorbatenko O., Jones B., Marten H., Solodov I., Slezak J. International overview of ISL uranium mining operations. In: *IAEA – Uranium raw material for the nuclear fuel cycle: Exploration, Mining, Production, Supply and Demand, Economics and Environment issues*. 23–27 June, 2014. Vienna, Austria, URAM; 2014.
6. Boystov A. Worldwide ISL Uranium Mining Outlook. In: *In Situ Leach Mining of Uranium: An Overview of Operations*. IAEA Nuclear Energy series NF-T-1.4 (URAM-2014). Vienna: IAEA; 2016.
7. Сушко С. М., Бегун А. Д., Федоров Б. В., Касенов А. К., Дауренбеков С. Д. *Методика сооружения скважин для разведки и добычи урана методом ПСВ*. Алматы: АО НАК «Казатомпром», ТОО «Институт высоких технологий»; 2007. 178 с.
8. Boytsov A. Worldwide ISL Uranium Mining Outlook: presentation. In: *Proceedings of the International Symposium on Uranium Raw Material for the Nuclear Fuel Cycle: Exploration, Mining, Production, Supply and Demand, Economics and Environmental Issues (URAM-2014)*. 23–27 June 2014. Vienna: IAEA; 2014. P. 1–23.
9. Mudd Gavin M., Critical review of acid in situ leach uranium mining: 1. USA and Australia, Cases and Solutions. *Environmental Geology*. 2001;(41):390–403. <https://doi.org/10.1007/s002540100406>
10. *Uranium 2018: Resources, Production and Demand*. A Joint Report by the Nuclear Energy Agency and the International Atomic Energy Agency. Boulogne-Billancourt, France: Nuclear Energy Agency (NEA); 2018. URL: https://oecd-nea.org/jcms/pl_15080/uranium-2018-resources-production-and-demand?details=true
11. Khawassek Y. M., Taha M. H., Eliwa A. A. Kinetics of Leaching Process Using Sulfuric Acid for Sella Uranium Ore Material, South Eastern Desert, Egypt. *International Journal of Nuclear Energy Science and Engineering*. 2016;(6):62–73. <https://doi.org/10.14355/ijnese.2016.06.006>
12. Брылин В. И. *Технология бурения и оборудование эксплуатационных скважин при отработке месторождений урана методом подземного выщелачивания*. Томск: Изд-во Томского политехнического университета; 2010. 218 с.
13. Бейсебаев А. М., Туякбаев Н. Т., Федоров Б. В. *Бурение скважин и горноразведочные работы*. М.: Недра; 1990. 303 с.
14. Гержберг Ю. М. Бурение ступенчатым забоем как средство ограничения искривления скважины. *Бурение и нефть*. 2013;(6):28–31.
15. Диева Н. Н., Вольпин С. Г., Корнаева Д. А., Штейнберг Ю. М. Повышение информативности исследований скважин, работающих при забойном давлении ниже давления насыщения, методом установившихся отборов. *Бурение и нефть*. 2014;(1):41–43.
16. Кейн С. А. *Современные технические средства управления траекторией наклонно-направленных скважин*. Ухта: УГТУ; 2014. 119 с.
17. Wu H.-H., Hinke S., Fan Y. A new well positioning technique: Access-independent ranging solution for providing accurate well completion. In: *Proceedings – SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. San Antonio, Texas, USA; 2017. <https://doi.org/10.2118/187050-ms>
18. Prawira A. Y. Logging while drilling operation. *Engineering Solid Mechanics*. 2019;7(3):163–178. <https://doi.org/10.5267/j.esm.2019.6.001>
19. Hearst Joseph R., Nelson Philip H. *Well logging for physical properties: a handbook for geophysicists, geologists, and engineers*. 1985. 571 p.
20. Aadnoy B. S., Cooper I., Miska S. Z., Mitchell R. F., Payne M. L. (eds.) *Advanced Drilling and Well Technology*. Society of Petroleum Engineers; 2009. 888 p.



21. Bourgoyne Jr. A. T., Millheim K., Chenevert M., Young Jr. F. S. *Applied Drilling Engineering*. SPE Textbook Series, Vol. 2. Society of Petroleum Engineers; 1991. 502 p.
22. Klingbiel T. The Uranium and Conversion Markets. In: *U.S. Women in Nuclear Conference. July 18, 2005*.
23. Mataev M. M., Rakishev B. R., Kenzhetaev G. S. The impact of ammonium bifluoride complex on colmatating formations during the process of in situ uranium leaching. *International Journal of Advanced Research*. 2017;5(2):147–154. <https://doi.org/10.21474/IJAR01/3126>
24. Meng H., Li Z., Ma F., et al. Preparation and characterization of surface imprinted polymer for selective sorption of uranium (VI). *Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2015;306(1):139–146. <https://doi.org/10.1007/s10967-015-4067-8>
25. Niyetbayev M., Yermilov A., Avdassyov I., Pershin M. The methods for performance improvement of technological wells at in-situ uranium leaching. In: *International Symposium on Uranium Raw Material for the Nuclear Fuel Cycle: Exploration, Mining, Production, Supply and Demand, Economics and Environmental Issues (URAM-2014). 23–27 June 2014*. Vienna: International Atomic Energy Agency; 2014. P. 81.
26. Башкатов Д. Н., Панков А. В., Коломиец А. М. *Прогрессивная технология бурения гидрогеологических скважин*. М.: Недра; 1992. 286 с.
27. Леонов Е. Г. Новая модель оптимизации режимов роторного бурения. Выбор лучшего типа долота. *Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море*. 2005;(5):2–5.
28. Polack C. Uranium exploration (2004–2014): New discoveries, new resources. In: *International Symposium on Uranium Raw Material for the Nuclear Fuel Cycle: Exploration, Mining, Production, Supply and Demand, Economics and Environmental Issues (URAM-2014). 23–27 June 2014*. Vienna: International Atomic Energy Agency; 2014. P. 8–9.
29. Woods P., Pool T., Beneš V., Gorbatenko O., Jones B., Märten H., Solodov I., Slezak J. International overview of ISL uranium mining operations. In: *International Symposium on Uranium Raw Material for the Nuclear Fuel Cycle: Exploration, Mining, Production, Supply and Demand, Economics and Environmental Issues (URAM-2014). 23–27 June 2014*. Vienna: International Atomic Energy Agency; 2014. P. 138.
30. Беркунов В. С., Леонов Е. Г. Обобщенные формулы для определения оптимальных значений времени отработки долота и его проходки. *Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море*. 1999;(10):20–21.
31. Булатов А. И., Демихов В. И., Макаренко П. П. *Контроль процессов бурения нефтяных и газовых скважин*. М.: Недра; 1998. 345 с.
32. Гержберг Ю. М., Кузнецов Н. И., Кишин В. И., Кулигин А. В. *Научные основы и современная технология безориентированного регулирования трассы скважины*. М.: ООО «ИРЦ Газпром»; 2008. 45 с.
33. Курочкин Б. М. *Техника и технология ликвидации осложнений при бурении и капитальном ремонте скважин*. В 2-х т. М.: ОАО «ВНИИОЭНГ». 2007;1:598; 2008;2:555.
34. Ошибков А. В., Двойников М. В. Исследование характеристик профилей наклонно-направленных скважин, представленных одной линией. *Бурение и нефть*. 2014;(6):18–20.
35. Пенкевич С. В. *Методические указания к расчету эрлифта при откачке из гидрогеологических скважин*. М.: МГПРУ; 2003. 28 с.
36. Цуприков Л. А. Определение параметров модели механической скорости бурения методом наименьших квадратов. В кн.: *Телекоммуникационные и информационные системы: тр. междунар. конф.* СПб.: Изд-во Политехн. ун-та; 2007. С. 274–276.
37. Доровских И. В., Подъячев А. А., Павлов В. А. Влияние изменения механических свойств горных пород при насыщении буровым раствором на напряженное состояние прискважинной зоны. *Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море*. 2014;(11):31–38.
38. Коротченко А.Н., Земляной А. А. Система регистрации параметров, закачиваемых в скважину жидкостей. *Бурение и нефть*. 2013;(1):49–50.

References

1. Rakishev B. R., Fedorov B. V. *Technique and process for the construction of geotechnological boreholes*. Almaty; 2013. 260 p. (In Russ.)
2. Armstrong D., Jeuken B. Management of In-Situ Recovery (ISR) Mining Fluids in a Closed Aquifer System. In: *Proceedings of the International Mine Water Conference. 19–23 October 2009*. New York: Curran Associates; 2009, pp. 688–697.
3. Armstrong D., Jeuken B. Management of in-situ recovery (ISR) mining fluids in a closed aquifer system. In: *Abstracts of the International Mine Water Conference*. South Africa; 2009, pp. 703–712.
4. Arnold N., Gufler K. The future of Nuclear Fuel Supply. In: *Proceedings of the 1st INRAG Conference on Nuclear Risk. 16–17 April 2015*. Vienna: University of Natural Resources and Life Sciences in Vienna; 2015, pp. 1–27.
5. Benes V., Gorbatenko O., Jones B., Marten H., Solodov I., Slezak J. International overview of ISL uranium mining operations. In: *IAEA – Uranium raw material for the nuclear fuel cycle: Exploration, Mining, Production, Supply and Demand, Economics and Environment issues. 23–27 June, 2014*. Vienna, Austria, URAM; 2014.



6. Boystov A. Worldwide ISL Uranium Mining Outlook. In: *In Situ Leach Mining of Uranium: An Overview of Operations*. IAEA Nuclear Energy series NF-T-1.4 (URAM-2014). Vienna: IAEA; 2016.
7. Sushko S. M., Begun A. D., Fedorov B. V., Kassenov A. K., Daurenbekov S. D. *Technique of borehole construction for exploration and production of uranium using ISL method*. Almaty: JSC NAC Kazatomprom, Institute of High Technology LLP (IHT); 2007. 178 p. (In Russ.).
8. Boytsov A. Worldwide ISL Uranium Mining Outlook: presentation. In: *Proceedings of the International Symposium on Uranium Raw Material for the Nuclear Fuel Cycle: Exploration, Mining, Production, Supply and Demand, Economics and Environmental Issues (URAM-2014)*. 23–27 June 2014. Vienna: IAEA; 2014, pp. 1–23.
9. Mudd Gavin M., Critical review of acid in situ leach uranium mining: 1. USA and Australia, Cases and Solutions. *Environmental Geology*. 2001;(41):390–403. <https://doi.org/10.1007/s002540100406>
10. *Uranium 2018: Resources, Production and Demand*. A Joint Report by the Nuclear Energy Agency and the International Atomic Energy Agency. Boulogne-Billancourt, France: Nuclear Energy Agency (NEA); 2018. URL: https://oecd-nea.org/jcms/pl_15080/uranium-2018-resources-production-and-demand?details=true
11. Khawassek Y. M., Taha M. H., Eliwa A. A. Kinetics of Leaching Process Using Sulfuric Acid for Sella Uranium Ore Material, South Eastern Desert, Egypt. *International Journal of Nuclear Energy Science and Engineering*. 2016;(6):62–73. <https://doi.org/10.14355/ijnese.2016.06.006>
12. Brylin V. I. *Drilling technology and equipment for production boreholes for in-situ leaching recovery of uranium*. Manual for graduate students: National Research Tomsk Polytechnic University, Yurga, Russia Tomsk, Publishing House of Tomsk Polytechnical University; 2010. 218 p. (In Russ.).
13. Beisebaev A. M., Tuyakbaev N. T., Fedorov B. V. *Borehole drilling and exploration*. Moscow: Nedra; 1990. 303 p. (In Russ.).
14. Gerzhberg Yu. Drilling with stepped face as mean to restrict deviation of well. *Burenie i Neft'*. 2013;(6):28–31. (In Russ.)
15. Dieva N., Vol'pin S., Kornaeva D., Shteinberg Yu. By method of settled production rates increasing of surveys information content of wells working with bottom-hole pressure lower than saturation pressure. *Burenie i Neft'*. 2014;(1):41–43. (In Russ.)
16. Kein S.A. *Modern facilities for directional drilling trajectory control*. Ukhta: USTU; 2014. 119 p. (In Russ.).
17. Wu H.-H., Hinke S., Fan Y. A new well positioning technique: Access-independent ranging solution for providing accurate well completion. In: *Proceedings – SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. San Antonio, Texas, USA; 2017. <https://doi.org/10.2118/187050-ms>
18. Prawira A. Y. Logging while drilling operation. *Engineering Solid Mechanics*. 2019;7(3):163–178. <https://doi.org/10.5267/j.esm.2019.6.001>
19. Hearst Joseph R., Nelson Philip H. *Well logging for physical properties: a handbook for geophysicists, geologists, and engineers*. 1985. 571 p.
20. Aadnoy B. S., Cooper I., Miska S. Z., Mitchell R. F., Payne M. L. (eds.) *Advanced Drilling and Well Technology*. Society of Petroleum Engineers; 2009. 888 p.
21. Bourgoyne Jr. A. T., Millheim K., Chenevert M., Young Jr. F. S. *Applied Drilling Engineering*. SPE Textbook Series, Vol. 2. Society of Petroleum Engineers; 1991. 502 p.
22. Klingbiel T. The Uranium and Conversion Markets. In: *U.S. Women in Nuclear Conference. July 18, 2005*.
23. Mataev M. M., Rakishev B. R., Kenzhetaev G. S. The impact of ammonium bifluoride complex on colmatating formations during the process of in situ uranium leaching. *International Journal of Advanced Research*. 2017;5(2):147–154. <https://doi.org/10.21474/IJAR01/3126>
24. Meng H., Li Z., Ma F., et al. Preparation and characterization of surface imprinted polymer for selective sorption of uranium (VI). *Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2015;306(1):139–146. <https://doi.org/10.1007/s10967-015-4067-8>
25. Niyetbayev M., Yermilov A., Avdassyov I., Pershin M. The methods for performance improvement of technological wells at in-situ uranium leaching. In: *International Symposium on Uranium Raw Material for the Nuclear Fuel Cycle: Exploration, Mining, Production, Supply and Demand, Economics and Environmental Issues (URAM-2014)*. 23–27 June 2014. Vienna: International Atomic Energy Agency; 2014, p. 81.
26. Bashkatov D. N., Pankov A. V., Kolomiets A. M. *Cutting edge technique for drilling hydrogeological boreholes*. Moscow: Nedra; 1992. 286 p. (In Russ.).
27. Leonov E.G. New model for optimization of rotary drilling practices. Selection of the best bit type. *Stroitel'stvo nef'tnykh i gazovykh skvazhin na sushe i na more*. 2005;(5):2–5. (In Russ.)
28. Polack C. Uranium exploration (2004–2014): New discoveries, new resources. In: *International Symposium on Uranium Raw Material for the Nuclear Fuel Cycle: Exploration, Mining, Production, Supply and Demand, Economics and Environmental Issues (URAM-2014)*. 23–27 June 2014. Vienna: International Atomic Energy Agency; 2014, pp. 8–9.
29. Woods P., Pool T., Beneš V., Gorbatenko O., Jones B., Märten H., Solodov I., Slezak J. International overview of ISL uranium mining operations. In: *International Symposium on Uranium Raw Material for the*



Nuclear Fuel Cycle: Exploration, Mining, Production, Supply and Demand, Economics and Environmental Issues (URAM-2014). 23–27 June 2014. Vienna: International Atomic Energy Agency; 2014, p. 138.

30. Berkunov B. C., Leonov E. G. Generalized formulas for determining optimal values of a bit drilling footage and operation time. *Stroitel'stvo nef'tianykh i gazovykh skvazhin na sushe i na more*. 1999;(10):20–21. (In Russ.)

31. Bulatov A. I., Demikhov V. I., Makarenko P. P. *Oil and gas boreholes drilling monitoring*. Moscow: Nedra; 1998. 345 p. (In Russ.)

32. Gerzhberg Yu. M., Kuznetsov N. I., Kirshin V. I., Kuligin A. V. *Scientific fundamentals and modern technique for non-oriented control of hole path*. Moscow: LLC IRC Gazprom; 2008. 45 p. (In Russ.)

33. Kurochkin B. M. *Technique and process for eliminating complications during drilling and overhaul of boreholes*. Moscow: JSC VNIOENG Publ. 2007;1:598; 2008;2:555. (In Russ.)

34. Oshibkov A. V., Dvoynikov M. V. Characteristics “survey of directional wells” profiles presented by one line. *Burenie i nef't'*. 2014;(6):18–20. (In Russ.)

35. Penkevich S. V. *Procedural guidelines for airlift calculation when pumping out of hydrogeological boreholes*. Moscow: MGGRU; 2003. 28 p. (In Russ.)

36. Tsuprikov L. A. Determination of the ROP model parameters by the least squares method. In: *Telecommunication and information systems. Proceedings of Int. Conf. St. Petersburg: Publ. House of Polytechnical University; 2007, pp. 274–276 (In Russ.)*

37. Dorovskikh I. V., Pod'yachev A. A., Pavlov V. A. Effect of changes in mechanical properties of rocks when saturating with drilling fluid on the stress state of the near well bore area. *Stroitel'stvo nef'tianykh i gazovykh skvazhin na sushe i na more*. 2014;(11):31–38. (In Russ.)

38. Korotchenko A., Zemlyanoy A. Registering system of parameters of liquids being pumped into well. *Burenie i Neft'*. 2013;(1):49–50. (In Russ.)

Информация об авторе

Динмухамед Нурболович Молдаши – председатель правления АО «Волковгеология» (АО «НАК «Казатомпром»), г. Алматы, Республика Казахстан; e-mail: priemnaya@vg.kazatomprom.kz

Information about the author

Dinmukhamed N. Moldashi – Chairman of the Board, Volkovgeologia JSC (NAC Kazatomprom), Almaty, the Republic of Kazakhstan; e-mail: priemnaya@vg.kazatomprom.kz

Поступила в редакцию 23.11.2020

Поступила после рецензирования 07.02.2021

Принята к публикации 08.02.2021

Received 23.11.2020

Revised 07.02.2021

Accepted 08.02.2021



СТРОИТЕЛЬСТВО ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ И ОСВОЕНИЕ ПОДЗЕМНОГО ПРОСТРАНСТВА

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-1-52-60>**Типология сооружений метрополитена для задач классификации геотехнических рисков****Е. В. Потапова***Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом», Москва, Россия*✉ elka23sp@yandex.ru**Аннотация**

Управление рисками является важной составляющей деятельности современного предприятия. В настоящее время менеджмент рисков должен включаться в общую систему менеджмента качества строительной организации. Геотехническое строительство и, в частности, строительство метрополитенов, также должно осуществляться с учетом возможных рисков. Строительство метрополитена сопряжено с наличием неопределенностей со стороны внешней среды – породного массива, и специфических геотехнических рисков, которые могут приводить к проявлению рискованных ситуаций с различными последствиями. Для прогноза потенциальных опасностей на всех стадиях жизненного цикла сооружения метрополитена требуется умение управлять рисками. Качество управления связано с детальностью идентификации риска, которая предшествует этапу определения вероятности наступления рискованной ситуации (этапу оценки риска). Для идентификации объекта требуется определение его состава, свойств, природы возникновения. Методом такого познания риска с разделением на группы посредством определения существенных признаков (оснований) является классификация. В настоящее время разработаны разные классификации рисков в строительстве. В статье рассмотрены различные подходы к классификации рисков в подземном строительстве, проанализирована возможность адаптации данных классификаций применительно к анализу геотехнических рисков при строительстве объектов метрополитена. Предложены принципы классификации геотехнических рисков. Обоснована типология сооружений метрополитена как основа классификации геотехнических рисков при строительстве объектов метрополитена. Представлены результаты разработки общей формы классификации геотехнических рисков при строительстве метрополитена.

Ключевые слова

горное дело, подземные сооружения, строительство, метрополитен, геотехнические риски, кластерный анализ

Благодарности

Автор выражает благодарность своему научному руководителю д.т.н., проф. Е. Ю. Куликовой за помощь в проведении исследования и рекомендации при подготовке статьи.

Для цитирования

Потапова Е. В. Типология сооружений метрополитена для задач классификации геотехнических рисков. *Горные науки и технологии*. 2021;6(1):52–60. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-1-52-60>

CONSTRUCTION OF MINING ENTERPRISES AND UNDERGROUND SPACE DEVELOPMENT

Research article

Typology of metro structures for the tasks of geotechnical risk classification**E. V. Potapova***Rosatom State Nuclear Energy Corporation, Moscow, Russian Federation*elka23sp@yandex.ru**Abstract**

Risk management is an important part of a modern enterprise activity. Currently, risk management should be included in the overall quality management system of a construction organization. Geotechnical construction, for instance, construction of metro, should also be carried out taking into account possible risks. Metro construction is connected with a number of uncertainties related to enclosing rock mass conditions, and specific geotechnical risks, which can lead to materialization of hazards with various consequences. Predicting possible hazards at all stages of a metro structure life cycle requires the ability to manage risks. The effectiveness of risk



management requires detailed risk identification, which precedes the stage of determining the probability of risk (the risk assessment stage). To identify an object, it is required to determine its composition, properties, physical origin. The method of such risk cognition with division into groups through determining the essential features (grounds) is classification. To date, different classifications of risks in construction activity have been developed. The paper discusses various approaches to the classification of risks in underground construction, analyzes the feasibility of adapting these classifications to the analysis of geotechnical risks in the construction of metro facilities. The principles of classification of geotechnical risks were proposed. The typology of metro structures has been substantiated as the basis for the classification of geotechnical risks in the construction of metro facilities. The results of the development of a general form for classification of geotechnical risks during a metro construction have been presented.

Key words

mining, underground structures, construction, metro, subway, geotechnical risks, cluster analysis

Acknowledgements

The author thanks Prof. E. Yu. Kulikova for her help in conducting experiments and recommendations during the preparation of the article.

For citation

Potapova E. V. Typology of metro structures for the tasks of geotechnical risk classification. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021;6(1):52–60. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-1-52-60>

Введение

Анализ данных по авариям и инцидентам в подземном строительстве показывает [1–7], что их сценарии характеризуются значительным разнообразием с точки зрения первопричин (рискообразующих факторов), развития дальнейших событий (проявления рисков ситуации) и последствий. Все сценарии обладают индивидуальностью, обусловленной спецификой объектов, на которых они локализируются. Для дальнейшего анализа рисков необходимо глубокое их изучение путем определения состава, свойств, природы возникновения, принципов формирования связей. Методом подобного познания посредством определения существенных признаков (оснований) является классификация [8]. В практике исследований предложены различные подходы к классификации рисков при строительстве подземных сооружений. Актуальной задачей является создание адаптированной классификации, отражающей специфику конкретных сооружений метрополитена и предназначенной для решения конкретных задач строительства метрополитена, которая позволит с достаточной степенью достоверности произвести идентификацию рискообразующих факторов, рисков ситуаций и возможных последствий для целей последующего анализа.

Целью представленного исследования являлось научное обоснование типологии сооружений метрополитена на основе классификации геотехнических рисков и их кластерного анализа.

Для выполнения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Выявление основных составляющих геотехнических рисков и принципов их классификации в подземном строительстве.
2. Установление количественных признаков классификации геотехнических рисков.
3. Обоснование критериев классификации геотехнических рисков и рискообразующих факторов.
4. Проведение кластерного анализа для выявления характерных типов сооружений метрополитена.

Подходы к классификации геотехнических рисков

Практика исследований предлагает различные подходы к классификации рисков при строительстве подземных сооружений. Предложенные классификации охватывают широкий диапазон признаков различного характера. Авторами [9] впервые классифицированы риски при строительстве городских подземных сооружений с разделением рисков на 8 групп: строительные, экологические, управленческие/исполнительские, коммерческие, экономические, контрактные, социальные и эксплуатационные. Важно отметить, что в [9] классификации подвергаются также рискообразующие факторы. Автором [10] предложена классификация, основанная на следующих критериях: масштаб воздействия, степень воздействия, степень зависимости от исходного события, тип информации, место проявления, размер ущерба и т.д. Автор приводит качественную характеристику риска для возможности отнесения его к той или иной группе. Автор [11] предлагает первый уровень классификации по следующим критериям (основаниям): по времени возникновения, факторам возникновения, характеру последствий, методам оценки.

Анализ различных подходов позволяет определить общие черты и выделить три составляющие геотехнического риска (рисковой ситуации):

- 1) **причина** (фактор, рискообразующий фактор, фактор возникновения, исходное событие),
- 2) **проявление** (проявление рисковой ситуации, место проявления, воздействие, распространение, длительность, рисковая ситуация),
- 3) **последствие** (характер последствий, размер ущерба, реализация каскадного сценария развития).

Следует отметить, что определению вероятности наступления рисковой ситуации предшествует идентификация (этап качественного анализа), которая будет основываться на классификации. На этапе качественного анализа важно изучить факторы возникновения и возможные последствия с оценкой их размера.

Сформулируем общие принципы классификации геотехнических рисков при строительстве метрополитена:

1. Структура классификации – многоуровневая.
2. Основанием (признаком, критерием) первого уровня классификации будет тип строящегося сооружения метрополитена (типологическая классификация).
3. Классификация выполняется по трем направлениям (составляющим рискованной ситуации):
 - 1 – классификация рискообразующих факторов;
 - 2 – классификация проявления рискованных ситуаций;
 - 3 – классификация последствий рискованных ситуаций.
4. Учет специфики природно-технической геосистемы (ПТГС) «массив – технология – подземное сооружение – окружающая среда» [12–15] при назначении критериев второго и последующих уровней и состава классификационных групп.

Типологическая классификация (типологии) сооружений метрополитена

Подземная линия метрополитена является элементом сложной природно-технической геосистемы (ПТГС) «массив – технология – подземное сооружение – окружающая среда». Наиболее значимыми для рассмотрения являются этапы строительства и эксплуатации линии. На этапе строительства рассматривается подземное сооружение, находящееся в процессе создания. Помимо отсутствия при строительстве перевозки пассажиров и работы постоянных инженерных систем отличительной особенностью является наличие изменений, происходящих с сооружением во времени, в породном массиве, в окружающей среде, а также связанные с этим процессом проектные ситуации и предельные состояния. Также отметим, что характерной особенностью строительства метрополитена является изменение функций одного и того же сооружения в зависимости от стадии жизненного цикла проекта. Например, при строительстве и эксплуатации подземной линии метрополитена вертикальные стволы могут выполнять следующие функции: вскрывающая и обслуживающая выработка для сооружения подходов к выработкам (этап строительства) и вентиляция (этап эксплуатации). Необходимость строительства временных горных выработок является еще одной особенностью подземных сооружений метрополитена при строительстве линий глубокого заложения. Это выработки околоствольных дворов рабочих стволов (обгонные выработки, камеры водоотливных и вентиляционных установок, подземные склады взрывчатых материалов, камеры ремонтных депо и т.д.), подходы и вспомогательные выработки. При этом размеры и сложность возведения этих выработок практически не отличаются от постоянных сооружений метрополитена. Таким образом, подземные сооружения метрополитена включают в себя особенности природно-технической геосистемы (ПТГС) с одной стороны, и транспортной системы – с другой (рис. 1), и представляют собой отдельное множество подземных сооружений.

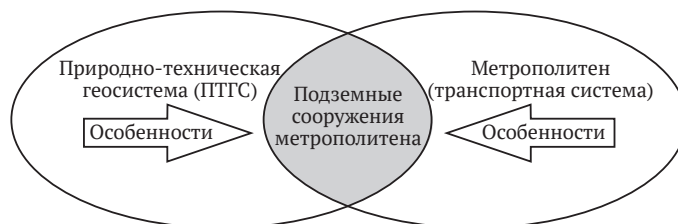


Рис. 1. Положение сооружения метрополитена в природно-технической геосистеме и транспортной системе

Fig. 1. The position of a metro structure in natural-and-technical geosystem and transport system

Проведенный в ходе исследования анализ позволяет выявить отсутствие общей типологической классификации подземных сооружений метрополитена. В то же время типологические классификации (типологии) существуют для большинства наземных промышленно-гражданских сооружений, транспортных сооружений [16–18]. Очевидно, что для такой сложной по технологии строительства, составу, структуре, функционалу системы, как метрополитен, необходима типологическая классификация (типология) сооружений на основании наиболее характерных признаков для каждой типологической группы. Для дальнейшей разработки классификации геотехнических рисков при строительстве сооружений метрополитена рассмотрим возможность разделения сооружений на устойчивые группы.

Используя практический опыт строительства, теоретические основы метрополитеностроения и утверждение о принадлежности сооружений метрополитена к природно-технической геосистеме (ПТГС) «массив – технология – подземное сооружение – окружающая среда», можно выделить две основные группы классификационных признаков:

- 1 – признаки, зависящие от технологии строительства сооружения;
- 2 – признаки, зависящие от объемно-планировочных и конструктивных особенностей сооружения.

К 1-й группе признаков отнесем технологические масштабы вскрытия земной поверхности и пересечение геологических слоев. Ко 2-й – характеристики продольных и поперечных размеров, объем сооружаемых конструкций, пространственное положение в породном массиве. Всего выбрано пять определяющих признаков (табл. 1).

Таблица 1 / Table 1

Признаки типологической классификации сооружений метрополитена

Parameters of the typological classification of metro structures

Наименование признака	Измеримость	Обозначение
Разнообразие геологических условий	Количественный	X_1
Степень нарушения целостности дневной поверхности, м ²	Количественный	X_2
Пропорции сооружения	Количественный	X_3
Объем сооружения, м ³	Количественный	X_4
Пространственное положение	Качественный	X_5

Далее необходимо преобразовать выбранные признаки для возможности дальнейшей сравнительной оценки и классификации. Для примера рассмотрим признаки X_1, X_2, X_3 :

1. Разнообразие геологических условий X_1 .

Количественный признак, который характеризуется количеством пересекаемых грунтовых слоев с различными литологией, гидрогеологией, инженерно-геологическими свойствами на 1 м наибольшего габарита сооружения:

$$X_1 = \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{\Gamma_{\max}}, \quad (1)$$

где $\sum_{i=1}^n a_i$ – сумма пересекаемых различных геологических слоев (a_i – отдельный геологический слой), шт. (определяется данными геологического разреза участка линии); $\Gamma_{\max}$ – наибольший габарит сооружения, м (например, глубина вертикального ствола, длина перегонного тоннеля, длина станции).

2. Степень нарушения целостности дневной поверхности X_2 .

Количественный признак, который характеризуется площадью вскрытия земной поверхности:

$$X_2 = S_{\text{вскр.з.п}}, \quad (2)$$

где $S_{\text{вскр.з.п}}$ – площадь вскрытия земной поверхности в процессе возведения сооружения, м^2 (определяется технологией).

3. Пропорции сооружения X_3 .

Количественный признак, который характеризуется соотношением площади поперечного сечения к наибольшему габариту сооружения:

$$X_3 = \frac{S_{\text{попер.сеч}}}{\Gamma_{\max}}, \quad (3)$$

где $S_{\text{попер.сеч}}$ – площадь поперечного сечения сооружения, м^2 ; $\Gamma_{\max}$ – наибольший габарит сооружения, м (например, глубина вертикального ствола, длина перегонного тоннеля, длина станции).

4. Объем сооружения X_4 .

Количественный признак, который характеризуется занимаемым объемом сооружения в породном массиве по наружному контуру:

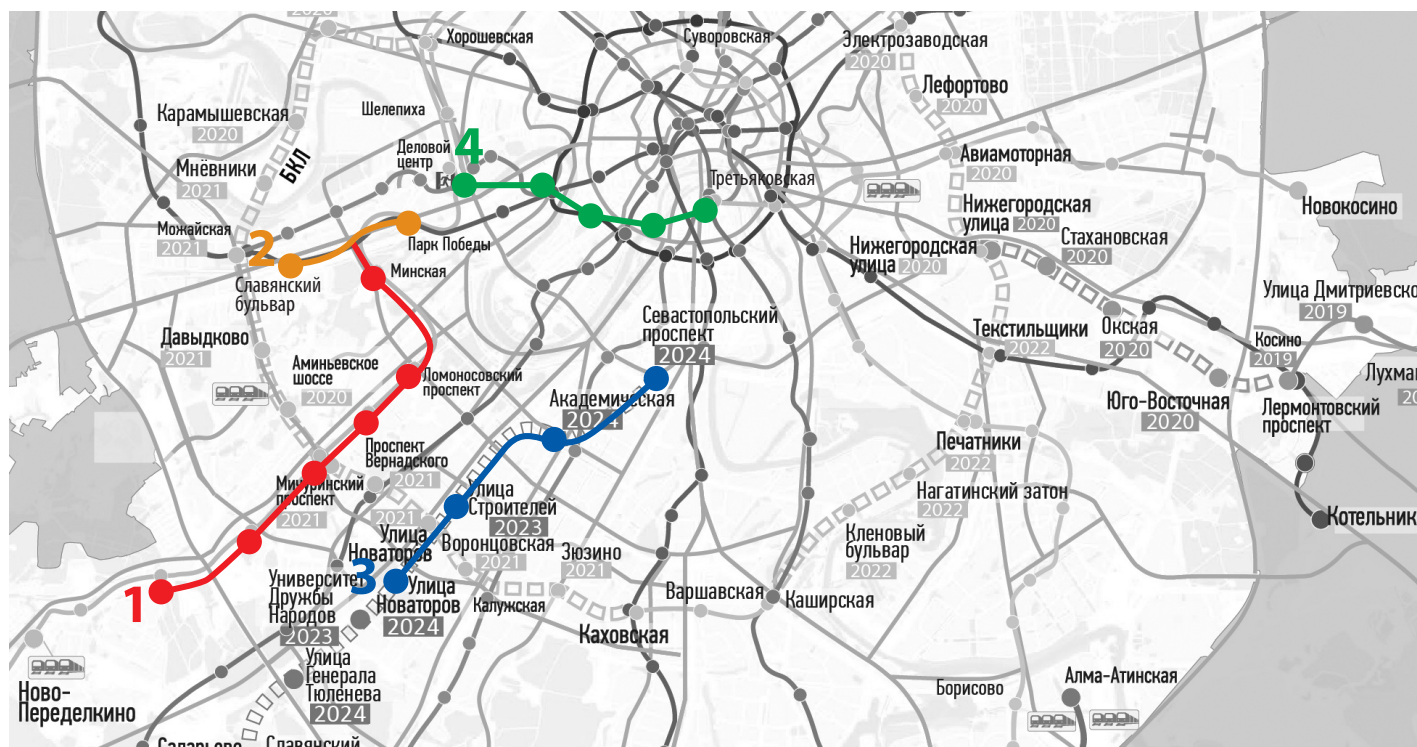
$$X_4 = V_{\text{соор}}, \quad (4)$$

где $V_{\text{соор}}$ – объем, который занимает сооружение в породном массиве по наружному контуру, м^3 .

5. Пространственное положение X_5 .

Качественный признак, который характеризуется положением центральной оси сооружения в пространстве породного массива (вертикальное, горизонтальное, наклонное) и имеет геометрический смысл.

Для определения возможных значений признаков рассмотрены сооружения метрополитена города Москвы, расположенные на четырех проектируемых, строящихся и построенных участках линий мелкого и глубокого заложения (рис. 2). Всего выбрано 40 со-



- 1 – участок Калининско-Солнцевской линии (ст. «Парк Победы» – ст. «Солнцево»)
- 2 – участок Арбатско-Покровской линии (ст. «Парк Победы» – ст. «Славянский бульвар»)
- 3 – участок Коммунарской линии (ст. «Улица Новаторов» – ст. «Севастопольский проспект»)
- 4 – участок Калининско-Солнцевской линии (ст. «Деловой центр» – ст. «Третьяковская»)

Рис. 2. Пространственное положение анализируемых участков линий метрополитена г. Москвы

Fig. 2. The spatial position of the analyzed sections of the Moscow metro lines

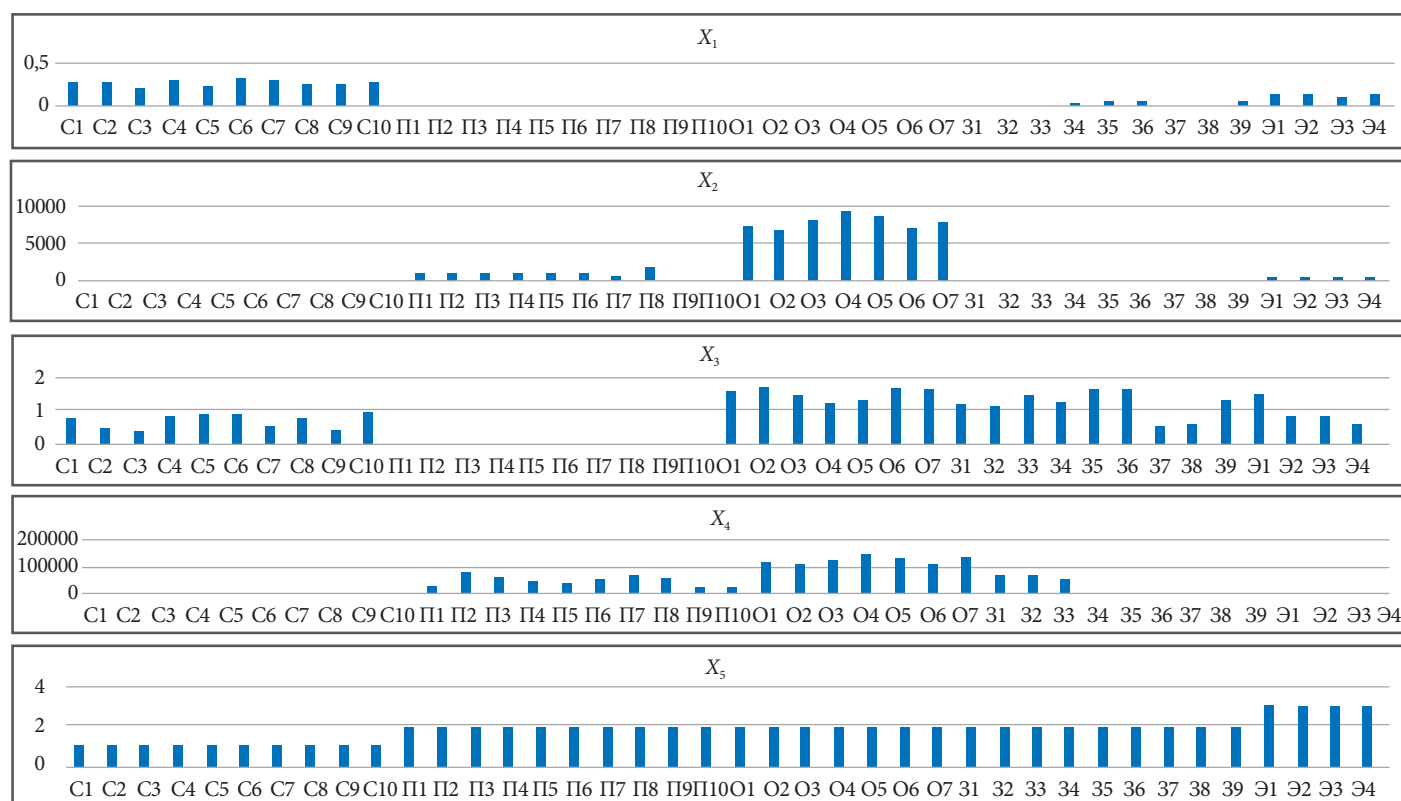


Таблица 2 / Table 2

Значения признаков типологической классификации (на примере сооружений метрополитена г. Москвы)

Values of the typological classification parameters (as exemplified by Moscow metro structures)

№	Сооружение	Обозначение	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5
1	Ствол ш. 463 (ст. «Парк Победы» – ст. «Славянский бульвар»)	C1	0,2721	268,6663	0,7716	4168,6444	Вертикальное
2	Ствол ш. 463а (ст. «Парк Победы» – ст. «Славянский бульвар»)	C2	0,2920	268,6663	0,4548	2134,2244	Вертикальное
:	:	:	:	:	:	:	:
10	Ствол ВШ (ст. «Академическая» – ст. «Севастопольский пр-т»)	C10	0,2712	268,6663	0,9613	3346,2588	Вертикальное
11	Перегонный тоннель ст. «Раменки» – ст. «Ломоносовский пр-т»	П1	0,0025	1 001	0,0233	34335,9	Горизонтальное
12	Перегонный тоннель ст. «Ломоносовский пр-т» – ст. «Минская»	П2	0,0015	1 013	0,0104	77008,5	Горизонтальное
:	:	:	:	:	:	:	:
20	Перегонный тоннель от ст. «Дорогомиловская» до ст. «Плющиха»	П10	0,0019	268,66625	0,0268	29757,78	Горизонтальное
21	Станция «Улица Строителей»	O1	0,0101	7400	1,6216	113664	Горизонтальное
22	Станция «Академическая»	O2	0,0218	6875	1,7455	105600	Горизонтальное
:	:	:	:	:	:	:	:
27	Станция «Ломоносовский проспект»	O7	0,0156	7856	1,658	135600	Горизонтальное
28	Станция «Волхонка»	31	0,0165	268,6663	1,2178	71460,8000	Горизонтальное
29	Станция «Плющиха»	32	0,0161	208,5667	1,1895	73160,0000	Горизонтальное
:	:	:	:	:	:	:	:
36	Венткамера (ст. «Парк Победы» – ст. «Славянский б.-р»)	39	0,0732	122,6563	1,3833	2325,3663	Горизонтальное
37	Эскалаторный тоннель ст. «Волхонка»	Э1	0,1400	400	1,5240	3808,1331	Наклонное
:	:	:	:	:	:	:	:
40	Эскалаторный тоннель ст. «Парк Победы»	Э4	0,1328	400	0,5953	9748,8208	Наклонное

Рис. 3. Диаграммы признаков X_1 – X_5 Fig. 3. Diagrams of X_1 – X_5 parameters

оружий: вертикальные стволы, эскалаторные тоннели, перегонные тоннели, станционные сооружения. Рассчитанные по формулам (1)–(4) значения признаков сведены в табл. 2.

В целях предварительной проверки предположения о наличии характерных типов сооружений построим столбчатые диаграммы признаков X_1 – X_5 (рис. 3).

Из рисунка видно, что в совокупности сооружений выделяются несколько групп в зависимости от признака. Однако нужно целостное разделение на основании всех признаков. В теории классификации выделяются три подобласти: кластеризация (кластер-анализ) и группировка, статистический анализ классификаций, дискриминация (дискриминантный анализ) [19]. Для целей нашего исследования применим методы кластерного анализа [20]. Последовательно проведен-

ная кластеризация с использованием программного комплекса Statistica с алгоритмом объединения «ближайший сосед» и евклидовой метрикой построения расстояний между объектами показала, что данные структурно неплохо разделены на пять основных кластеров. При уровне схожести приблизительно 0,42 хорошо отделены пять групп объектов на дендрограмме (рис. 4): (11–20); (21–27); (37–40); (1–10); (28–36). Данные группы соответствуют обозначениям наблюдений С1–С10, П1–П10, О1–О7, 31–39 и Э1–Э4 (табл. 2). При этом группа С1–С10 соответствует вертикальным стволам, П1–П10 – горизонтальным перегонным тоннелям, О1–О7 – станциям мелкого заложения, сооружаемым открытым способом, 31–39 – станциям глубокого заложения, сооружаемым закрытым способом, Э1–Э4 – эскалаторным тоннелям.

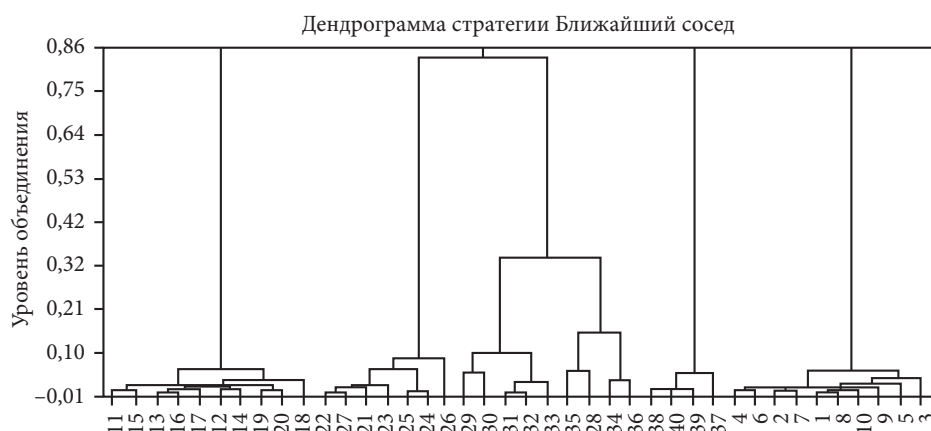


Рис. 4. Дендрограмма с выделенными кластерами

Fig. 4. Dendrogram with distinguished clusters

I уровень			II уровень			III уровень			IV уровень		
Критерий			Критерий			Критерий			Критерий		
№	Наименование	Группа	№	Наименование	Группа	№	Наименование	Группа	№	Наименование	Группа
1	По типу сооружения	Вертикальный ствол									
		Горизонтальный (перегонный) тоннель									
		Сооружение станционного и дополнительного назначения мелкого заложения (открытый способ)									
		Сооружение станционного и дополнительного назначения глубокого заложения (закрытый способ)									
		Наклонный (эскалаторный) тоннель									
			2	По характеру происхождения							
			3	По характеру проявления							
3.2	По виду разрушения										
									4	По месту проявления	
									4.1	По точке локализации	



Таким образом, выполненный кластерный анализ подтверждает наличие характерных типов сооружений метрополитена. В табл. 3 представлена типологическая классификация (типология) сооружений метрополитена.

Таблица 3 / Table 3

Типологическая классификация (типология) сооружений метрополитена

Typological classification (typology) of metro structures

Вертикальный ствол	Горизонтальный (перегонный) тоннель	Сооружение станционного и дополнительного назначения мелкого заложения (открытый способ)	Сооружение станционного и дополнительного назначения глубокого заложения (закрытый способ)	Наклонный (эскалаторный) тоннель

Учитывая установленные принципы и критерии классификации, рассмотрим общую форму классификации на примере классификации проявления рисков ситуаций (рис. 5). Типология сооружений метрополитена является основанием (критерием) первого уровня.

Заключение

1. Предложенная типология основывается на учете особенностей метрополитена как природно-технической геосистемы с одной стороны, и как сложной подземной транспортной системы – с другой стороны. Типология составляет основу адаптированной

классификации геотехнических рисков при строительстве объектов метрополитена, которая будет использоваться в методике анализа риска на основании экспертно-статистического подхода при формировании шифра рисков ситуации в информационно-аналитическом архиве рисков и идентификации рисков при экспертной оценке [21].

2. Типология рассматривает сооружения метрополитена не только с позиции их функционального назначения после ввода в эксплуатацию. Она учитывает динамическую природу процесса строительства подземного объекта, изменение его функций на различных стадиях жизненного цикла. Такой подход соответствует задачам управления геотехническими рисками, так как наличие данных рисков определяется как неотъемлемый элемент процесса строительства подземного сооружения.

3. Исходя из типологии будут определяться рискообразующие факторы, проявления рисков ситуаций, последствия проявлений, а также формироваться классификационные группы критериев следующих уровней. Это позволит более точно производить идентификацию и прогноз возможного геотехнического риска, подбирать наиболее эффективные мероприятия по его минимизации, определять максимально приемлемый размер ущерба.

4. Предложенная типология сооружений метрополитена актуальна для включения в образовательные программы подготовки горных инженеров и риск-менеджеров для формирования необходимых компетенций в области управления рисками при комплексном освоении подземного пространства городов.

Список литературы

1. Кауфман Л. Л., Лысиков Б. А. *Геотехнические риски в подземном строительстве (обзор зарубежного опыта)*. Донецк: Норд-Пресс; 2009. 362 с.
2. Власов С. Н., Маковский Л. В., Меркин В. Е. *Аварийные ситуации при строительстве и эксплуатации транспортных тоннелей и метрополитенов*. М.: ТИМР; 2000. 197 с.
3. Гарбер В. А. Нештатные ситуации в подземных транспортных сооружениях. *Подземные горизонты*. 2018;(16):20–25.
4. Мазаник Т. А., Потапов М. А., Потапова Е. В. Рекомендации по минимизации деформаций земной поверхности (на примере применения стволопроходческого комплекса для строительства метро. *Метро и тоннели*. 2016;(3):12–16.
5. Потапов М. А., Потапова Е. В. Стволопроходческие комплексы: практика применения для проходки вертикальных стволов московского метрополитена за последние 10 лет. *Метро и тоннели*. 2016;(2):12–16.
6. Rita L. Sousa. *Risk Analysis for Tunneling Projects: Thesis (Ph. D.)* Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Civil and Environmental Engineering, 2010. URL: <http://hdl.handle.net/1721.1/58282>
7. Atkins W.S. *The risk to third parties from bored tunnelling in soft ground*. HSE Books; 2006. 78 p. URL: <https://www.hse.gov.uk/Research/rpdf/rr453.pdf>
8. Понкин И. В., Редькина А. И. Классификация как метод научного исследования, в частности в юридической науке. *Вестник Пермского университета. Юридические науки*. 2017;37:249–259. <https://doi.org/10.17072/1995-4190-2017-37-249-259>
9. Куликова Е. Ю., Корчак А. В., Левченко А. Н. *Стратегия управления рисками в городском подземном строительстве*. М.: Изд-во Моск. гос. гор. ун-та, 2005. 206 с.
10. Кофан. О. С. *Повышение качества и безопасности строительства тоннелей метрополитена на основе анализа риска: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.11*. СПб.; 2002. 146 с.
11. Чунюк Д. Ю. Особенности классификации и составляющие геотехнического риска в строительстве. *Промышленное и гражданское строительство*. 2013;(9):42–44.



12. Куликова Е. Ю. Методика интегральной оценки риска в шахтном и подземном строительстве. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021;(2-1):124–133. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2021-21-0-124-133>
13. Kulikova E. Yu. Defects of urban underground structure and their prediction. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018;451(1):012108. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/451/1/012108>
14. Kulikova E. Yu., Balovtsev S. V. Risk control system for the construction of urban underground structures. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;962(4):042020. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/962/4/042020>
15. Куликова Е. Ю., Виноградова О. В. Риски как причина снижения промышленной безопасности при строительстве подземных сооружений. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2020;(7):146–154. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-7-0-146-154>
16. Рачкова О. Г. *Архитектура транспортных сооружений*. 2-е изд. М.: Юрайт; 2018. 197 с.
17. Мубаракшина Ф. Д., Рачкова О. Г. К вопросу о современной типологии и некоторых проблемах архитектуры транспортных сооружений. *Известия КГАСУ*. 2012;(1):17–23.
18. Калабин А. В. Типология жилых зданий малой и средней этажности: современное состояние. *Академический вестник УРАЛНИИПРОЕКТ РААСН*. 2014;(1):63–69.
19. Орлов А. И. Математические методы теории классификации. *Политематический сетевой электронный научный журнал КубГАУ*. 2014;95:23–45.
20. Енюкова И. С. (ред.) *Факторный, дискриминантный и кластерный анализ*. М.: Финансы и статистика; 1989. 215 с.
21. Potapova E. V. Expert-statistical approach to the analysis of geotechnical risks in the construction of metro facilities. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety (ICCATS 2020). 6–12 September 2020. Sochi*. 2020;962:042052.

References

1. Kaufman L. L., Lysikov B. A. *Geotechnical Risks in Underground Construction (Review of Foreign Experience)*. Donetsk: Nord-Press; 2009. 362 p. (In Russ.).
2. Vlasov S. N., Makovsky L. V., Merkin V. E. *Emergency situations during the construction and operation of transport tunnels and subways*. Moscow: TIMP; 2000. 197 p. (In Russ.).
3. Garber V. A. Abnormal situations at underground transport facilities. *Podzemnye gorizonty*. 2018;(16):20–25. (In Russ.).
4. Mazanik T. A., Potapov M. A., Potapova E. V. Recommendations to minimize deformations of earth's surface (for example use of vsm complex for subway building). *Metro i tonneli*. 2016;(3):12–16.
5. Potapov M. A., Potapova E. V. Vertical shaft sinking machine: application practice for sinking vertical shafts of the moscow metro over last 10 years. *Metro i tonneli*. 2016;(2):12–16.
6. Rita L. Sousa. *Risk Analysis for Tunneling Projects: Thesis (Ph. D.)* Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Civil and Environmental Engineering, 2010. URL: <http://hdl.handle.net/1721.1/58282>
7. Atkins W.S. *The risk to third parties from bored tunnelling in soft ground*. HSE Books; 2006. 78 p. URL: <https://www.hse.gov.uk/Research/rpdp/rr453.pdf>
8. Ponkin I. V., Redkina A. I. Classification as a method of scientific research, particularly in jurisprudence *Perm university herald. Juridical sciences*. 2017;37:249–259. <https://doi.org/10.17072/1995-4190-2017-37-249-259>
9. Kulikova E. Yu., Korchak A. V., Levchenko A. N. *Risk management strategy in urban underground construction activity*. Moscow: MSU Publ. House; 2005. 206 p. (In Russ.).
10. Kofan O. S. *Improving the quality and safety of metro tunnel construction based on risk analysis: Ph.D. thesis in Engineering Science*. 05.23.11. St. Petersburg; 2002. 146 p. (In Russ.).
11. Chunyuk D. Yu. Features of classification and components of geotechnical risk in construction. *Industrial and civil engineering*. 2013;(9):42–44 (In Russ.).
12. Kulikova E. Yu. Methods of forming an integral risk assessment in mine and underground construction. *MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2021;(2-1):124–133. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2021-21-0-124-133>
13. Kulikova E. Yu. Defects of urban underground structure and their prediction. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018;451(1):012108. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/451/1/012108>
14. Kulikova E. Yu., Balovtsev S. V. Risk control system for the construction of urban underground structures. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;962(4):042020. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/962/4/042020>
15. Kulikova E. Yu., Vinogradova O. V. Risks as a cause of industrial safety inhibition in underground construction. *MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2020;(7):146–154. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-7-0-146-154>



16. Rachkova O. G. *Architecture of transport structures*. 2nd ed. Moscow: Yurait; 2018. 197 p. (In Russ.).
17. Mubarakshina F. D., Rachkova O. G. Modern typology and some problems of the architecture of transport facilities resume. *Izvestiya KGASU*. 2012;(1):17–23. (In Russ.)
18. Kalabin A. V. Typology of residential buildings, small and medium number of storeys: current status. *Akademicheskij vestnik uralniiproekt RAASN*. 2014;(1):63–69.
19. Orlov A. I. Mathematical methods of classification theory. *Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*. 2014;95:23–45.
20. Enyukova I. S. (ed.) *Factorial, Discriminant, and Cluster Analysis*. Moscow: Finansy i Statistika; 1989. (In Russ.)
21. Potapova E. V. Expert-statistical approach to the analysis of geotechnical risks in the construction of metro facilities. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety (ICCATS 2020). 6–12 September 2020. Sochi. 2020;962:042052*.

Информация об авторе

Елена Владимировна Потапова – главный специалист производственно-технического отдела, Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом», г. Москва, Россия, e-mail: elka23sp@yandex.ru

Information about the author

Elena V. Potapova – Chief Specialist of the Production and Technical Department, Rosatom State Nuclear Energy Corporation, Moscow, Russian Federation; e-mail: elka23sp@yandex.ru

Поступила в редакцию 09.01.2021

Поступила после рецензирования 10.03.2021

Принята к публикации 12.03.2021

Received 09.01.2021

Revised 10.03.2021

Accepted 12.03.2021