

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](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).



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

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

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

Журнал стремится развивать 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

Буй 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



ОПЫТ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТОВ В ГОРНОПРОМЫШЛЕННОМ СЕКТОРЕ ЭКОНОМИКИ

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-1-5-15>**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>

EXPERIENCE OF MINING PROJECT IMPLEMENTATION

Research article

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>

Введение

В России расположены крупнейшие в мире запасы торфа, которые недостаточно изучены и слабо используются в национальной экономике. Тверской регион занимает центральное место в Центральном федеральном округе России. Минерально-сырьевая база региона довольно скудная по видам полезных ископаемых и представлена в большей части общераспространенными природными ресурсами, такими как: торф, сапропель, бурый уголь, песок (стекольный и строительный), гравий и щебень, глина (легко- и тугоплавкая, бентонитовая), известняк (чистый, мраморный, доломитовый, кремнистый), мергель, кварцит и кварц, минеральные грязи и воды. Вся разведанная минерально-сырьевая база региона насчитывает около 3738 различных месторождений и залежей полезных ископаемых, но промышленностью Тверского региона освоено только 8 % из них, при этом из известных 15 видов различных полезных ископаемых добывается только 10 [1, 2]. Основа экономики Тверского региона – промышленность, предприятия которой приносят до 30 % валового регионального продукта. По итогам 2019 г. промышленными предприятиями отгружено товарной продукции на сумму 444 млрд руб. (442 млрд руб. в 2018 г.). Однако в структуре регионального ВВП доля горного сектора также менее 1 %, такой незначительный вклад в региональную экономику показывает крайне неэффективное использование местной минерально-сырьевой базы, что может привести к росту сырьевой зависимости отраслей промышленности Тверского региона.

Торф – это уникальное природное, сложное, комплексное химическое сырье с широким классом органических и химических соединений, веществ, имеющих большое значение для многих отраслей и направлений хозяйственного использования. За последние годы мировой объем добычи торфа сократил-

ся примерно в четыре раза. Особенно, многократны темпы падения добычи торфа в торфодобывающих регионах России (в 2000 г. – 13,6 млн т; в 2019 г. – 2 млн т). В условиях экономической нестабильности регионы пытаются выйти из затруднительного положения за счет рационального использования собственных минерально-сырьевых ресурсов [3, 4].

Одним из приоритетных направлений в региональной программе Тверской области «Управление природными ресурсами и охрана окружающей среды» на 2017–2022 годы является повышение эффективности использования местного природно-ресурсного потенциала. Но несмотря на это добывающий комплекс Тверского региона слабо представлен в структуре региональной экономики. Доля добывающих отраслей в величине совокупного валового регионального продукта не превышает трех процентов. Даже долгосрочная целевая программа Тверской области «Комплексная программа по повышению энергетической эффективности региональной экономики и по сокращению энергетических издержек в бюджетном секторе Тверской области на период до 2030 года», предполагающая создание условий для расширения использования возобновляемых источников энергии, вторичных энергетических ресурсов и местных видов топлива, не дала реальных стимулов для развития торфопредприятий. Несмотря на предпринимаемые попытки администрации Тверской области возродить торфяную отрасль, данные статистики показывают, что затянувшийся экономический кризис привел к банкротству многих торфодобывающих предприятий, в то время как экономическая безопасность немногочисленных действующих торфяных производств оказалась под угрозой. Так, по торфяной отрасли в Тверском регионе доля ликвидированных торфодобывающих предприятий составляет 90 %. Чаще всего причинами их ликвидации становятся:



– отсутствие четко определяющего места торфа и торфяных месторождений в федеральном законодательстве страны;

– отсутствие внятной экономической политики по отношению к торфяным предприятиям относительно платежей за пользование природными ресурсами и земельного налога;

– задолженность по налогам, в особенности НДС, и обязательным платежам в другие фонды, задолженность по арендной плате в бюджет региона;

– высокая степень износа оборудования и малозначительное обновление парка современными машинами, а также отсутствие отечественного отраслевого машиностроения;

– устаревшие и не соответствующие современным технико-экономическим требованиям технологии разработки торфяных месторождений, а также большая зависимость производственного процесса добычи торфа от погодных условий;

– отсутствие специализированных информационных технологий проектирования и управления торфодобывающим производством;

– низкий спрос на продукцию, вызванный отсутствием стратегических исследований рынка для поиска новых возможностей реализации торфяной продукции, бизнес-планирования, инвестиций в производство;

– отсутствие свободных финансовых средств у предприятий;

– отсутствие исследований взаимосвязи производственно-технических, геологических и природных факторов с показателями экономической эффективности хозяйственной деятельности предприятий, добывающих торф.

Многими исследователями до сих пор ведутся дискуссии по вопросам повышения экономической эффективности и инвестиционной привлекательности торфодобывающей отрасли, но четких решений по таким актуальнейшим вопросам пока не выработано. На федеральном уровне были предложены различные модели управленческих решений, включая создание соответствующей законодательной базы. В итоге до сегодняшнего дня так и не удалось принять Федеральный Закон «О торфе». А между тем торф довольно широко представлен в структуре минерально-сырьевой базы всех регионов России и относится к категории общераспространенных, возобновляемых ресурсов большого спектра хозяйственного использования [5]. К тому же торфодобывающий и торфоперерабатывающий секторы региональной экономики являются сферой малого и среднего предпринимательства. В свою очередь, рост количества предприятий малого и среднего бизнеса можно по праву считать индикатором благоприятного инвестиционного климата, экономической и сырьевой безопасности, а также экономического развития региона.

Методология исследования

В практике оценки экономической эффективности предприятий торфяной отрасли используется в основном общий для всех горнодобывающих про-

изводств подход, при этом не учитывается специфика торфодобывающего производства. А потому большинство методик анализа и оценки экономической эффективности торфодобывающих предприятий дают неадекватный результат [6–10]. К тому же отсутствует общая оценка современного экономического состояния торфяной отрасли и ее значения для экономики регионов. Следует отметить, что практически отсутствуют попытки оценить уровень экономической безопасности и экономической эффективности торфяной отрасли, а ведь торф – это самый распространенный ресурс, который встречается во всех регионах России, а его промышленную разработку ведут в 20 субъектах РФ. Неустойчивое развитие предприятий торфяной отрасли приводит к росту угрозы потери экономической безопасности и нестабильности развития горнодобывающего сектора региональной экономики.

В современной экономической литературе нет однозначных и четких методик оценки уровня как экономической эффективности, так и экономической безопасности предприятий. Методов оценки уровня экономической безопасности довольно много, и различаются они степенью сложности и трудоемкости расчетов, а также набором информационных данных: методы экспертных оценок, статистические методы, многокритериальные методы, комплексный анализ экономических параметров, опросный метод, методы «теории игр» и др. Каждый автор предлагает свою методику для определения угроз устойчивого развития предприятий. Одни считают, что экономическая безопасность – это динамическая система показателей, а оценивать уровень экономической безопасности следует по темпам изменения этих показателей во времени (то есть по относительным величинам), это своего рода экономический потенциал развития предприятия. Другие предлагают систему критериев и индикаторов (абсолютных значений) основных экономических показателей, чаще всего сводя оценку экономической безопасности предприятия к определению финансового состояния и кризисного уровня. При этом полагают, что экономическая безопасность отражает устойчивое развитие производства и тесно связана с его экономической эффективностью. Следует отметить, что в случае оценки устойчивости хозяйственной деятельности торфодобывающих предприятий необходимо знать оптимальные величины (пороговые значения) параметров, характеризующих экономически эффективное состояние предприятия. И здесь возникает проблема, ведь для торфодобывающей отрасли исследованием параметров эффективности хозяйственной деятельности и оценкой пороговых значений практически никто не занимался.

Анализ научных взглядов в области определения экономической безопасности позволил авторам конкретизировать это понятие для торфодобывающей отрасли: экономическая безопасность торфяной отрасли – это устойчивое, эффективное и соответствующее современным технико-экономическим, экологическим, социальным требованиям и условиям состояние развития предприятий, составляю-



щих отрасль. При этом предприятия отрасли добычи торфа должны демонстрировать высокую адаптацию и гибкость к внутренним и внешним угрозам хозяйственной деятельности, отличаться независимостью в вопросах своего развития и способностью защищаться от любых видов угроз. На рис. 1 представлена методологическая схема диагностики экономической безопасности торфодобывающих предприятий. Для принятия антикризисного решения о выборе и корректировке бизнес-моделей и стратегий развития торфодобывающего предприятия необходимо иметь четкое представление о методике диагностики экономической безопасности. В предлагаемой методике проводится комплексный анализ всех элементов экономической безопасности предприятия по данным экономической, финансовой и производственной отчетности торфодобывающих производств (см. рис. 1).

С точки зрения экономической теории для повышения эффективности использования минерально-сырьевых ресурсов можно применить концепцию природной ренты. Собственно говоря, ценность природных ресурсов характеризуется их способностью приносить доход [11].

В торфодобывающей отрасли факторы и механизм образования ренты остаются малоизученными. В трактовке автора торфяная рента – это разновидность природной горной ренты, которая генерируется только в торфодобывающей отрасли и носит относительно постоянный характер из-за способности торфа к самовосстановлению. Необходимость оценки и выделения из прибыли торфяной ренты в современных социально-экономических условиях определяется самой спецификой торфяного производства, тем, что в природе не существует двух одинаковых торфяных месторождений, а следовательно, и прибыли пред-

приятий, осуществляющих их разработку, будут отличаться главным образом из-за различий горно-геологических и климатических условий эксплуатации, а также уровня инновационности используемых технологий добычи торфа [12–15].

Данные и метод исследования

Тверской регион занимает лидирующее место по запасам торфяного сырья, именно здесь сосредоточено 2082 млн т (около 50 %) торфяных запасов Центрального федерального округа России (в пересчете по 40%-ной влажности). Для Тверского региона торфяная отрасль долгое время была основой горнодобывающего сектора регионального хозяйства, однако в настоящее время (табл. 1) роль ее незначительна. До 1990 г. в регионе ежегодно добывалось около 6 млн т торфа. В настоящее время совокупная добыча всех торфопредприятий России составляет 1,5 млн т. Традиционно добытый торф использовался как резервное топливо на региональных ТЭЦ, но с переходом на природный газ в структуре топливного баланса доля торфа составляет около 1 %. Другое традиционное направление использования торфа – для нужд агропромышленного комплекса – в настоящее время более востребовано, но ввиду слабой платежеспособности сельскохозяйственных предприятий спрос на торфопroduкцию крайне слабый [16–19].

Как показывает табл. 1, продукция торфодобывающего сектора составляет менее 1 % в структуре объема отгруженных товаров горного сектора экономики Тверского региона. Причем самая высокая доля убыточных предприятий приходится также на торфяной сектор. Основой горнодобывающего комплекса Тверского региона являются отрасли нерудной промышленности, добывающие в основном сырье

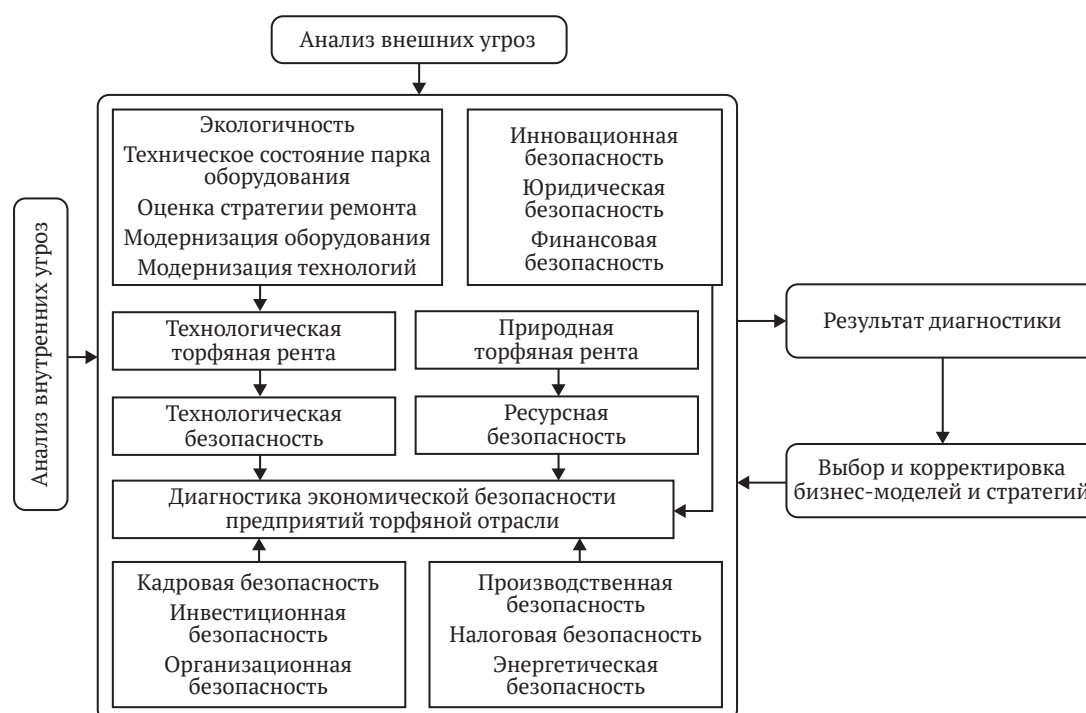


Рис. 1. Методология анализа и оценки экономической безопасности (составлено авторами)



для строительной индустрии. Что касается торфодобывающей отрасли, то уже в 2016 г. до 90 % предприятий находилось в стадии банкротства, а это в свою очередь показывает крайне неустойчивое развитие всей торфяной отрасли. Темпы добычи торфа всеми предприятиями торфяной отрасли Тверского региона до 2017 г. были весьма незначительны – не более 100 тыс. т (табл. 2). Поэтому для сохранения торфяной отрасли в регионе с 2011 г. был организован торфяной энергетический кластер, возглавляемый корпорацией «Биоэнергия».

Как показывает табл. 2, объемы добычи минерального сырья добывающего комплекса Тверского региона упали в 2013 г. и только к 2019 г. достигли 50 % от показателей 2012 г. При этом добыча топливно-энергетических полезных ископаемых, представленных торфяными ресурсами, резко упала после 2014 г. и полностью прекратилась в 2017 г. Однако здесь следует отметить, что, несмотря на прекращение добычи торфа топливного назначения, добыча торфа для агропромышленных нужд растет, хотя и медленными

темпами. В Тверской области основную часть запасов торфа (более 60 %) составляют залежи верхового типа, 28 % – низинного и 11 % – переходного и смешанного типов. Торфяные месторождения разнообразны по размерам площадей, типам, мощности и строению залежей торфа. Разнообразие торфа по геологическому составу и физико-химическим свойствам позволяет использовать категорию «торфяной ренты» как индикатора эффективности хозяйственной деятельности торфодобывающих предприятий, позволяющую оценить экономическую безопасность производства торфа [20–24]. Для оценки экономической безопасности предприятий по добыче торфа была разработана следующая методика (рис. 1):

1. Вся технико-экономическая, производственная и финансовая информация сортировалась по элементам экономической безопасности (табл. 3).

2. По каждому элементу определялся набор основных индикаторов (табл. 4) и определялись пороговые значения как средние по всем торфопредприятиям Тверского региона.

Таблица 1

Горнодобывающий комплекс Тверского региона в 2016 г.

Показатель	Сырье для цементной отрасли	Торфяная отрасль	Добыча ПГС	Добыча глины	Всего
Объем отгруженных товаров, млрд руб.	499	0,5	362	241	1102,5
Среднесписочная численность работников, чел.	350	100	200	230	880
Среднемесячная заработная плата, руб.	33 500	12 300	26 293	29 120	21 803
Доля убыточных предприятий, %	1	90	2	1	–

Источник: составлено авторами по данным территориального органа Федеральной службы государственной статистики по Тверской области <https://tverstat.gks.ru/>

Таблица 2

Динамика объема выпуска продукции торфяной отрасли добывающего комплекса Тверской области, млн руб.

Продукция торфодобывающей отрасли	Годы							
	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Промышленная продукция добывающего комплекса	2216	1896	1517	788	726	774	877	1102
Добыча топливно-энергетических ПИ	590	613	287	0,4	1,4	–	–	–
Добыча торфа для сельского хозяйства	2,3	1,7	1,4	1,55	1,6	1,68	1,7	1,75

Источник: составлено авторами по данным территориального органа Федеральной службы государственной статистики по Тверской области <https://tverstat.gks.ru/>

Таблица 3

Характеристика элементов экономической безопасности торфодобывающего предприятия (фрагмент)

Элемент	Характеристика
Технологическая безопасность	Соответствие структуры парка технологического оборудования требованиям современных технологий добычи торфа, экологии и стратегии предприятия
Ресурсная безопасность	Доказанная обеспеченность объемов запасов торфа надлежащего геологического качества, эффективное использование благоприятных условий сезона добычи торфа
Финансовая безопасность	Оптимальное и достаточное соотношение собственного и заемного капитала
Инвестиционная безопасность	Соответствие уровня деловой активности выбранной стратегии развития
Налоговая безопасность	Колебания ставки НДС на торф, арендных и экологических платежей, соответствие налогового режима выбранной бизнес-стратегии
Кадровая безопасность	Обеспеченность квалифицированным персоналом
Инновационная безопасность	Наличие охранных документов (патентов, авторских свидетельств и т.д.). Доля инновационной продукции в структуре ассортимента
...	...

Источник: составлено авторами.



3. По данным табл. 5 для определенных уровней экономической безопасности рассчитывались показатели.

4. Методом экспертных оценок расставлялись баллы: 0 баллов – устойчивый, 6 баллов – пороговый, 12 баллов – критический, 18 баллов – кризисный. Уровни экономической безопасности торфодобывающего предприятия: устойчивый (У), пороговый (П), критический (К), кризисный (КР). Показатель экономической безопасности торфопредприятия ($ЭБ_{\text{тп}}$) определяли как среднее значение по формуле:

$$ЭБ_{\text{тп}} = \frac{\sum X_i}{\sum N_i}, \quad (1)$$

где $\sum X_i$ – балльные оценки параметров из табл. 4; $\sum N_i$ – количество параметров из табл. 5. Градации уровня экономической безопасности определялись авторами после расчета показателя экономической безопасности: устойчивый (от 0 до 6 баллов); пороговый (от 6 до 12 баллов); критический (от 12 до 18 баллов); кризисный (свыше 18 баллов).

Таблица 4

Пороговая оценка основных индикаторов экономической безопасности торфопредприятия (фрагмент)

№	Индикатор	У	П	К	КР
1	Уровень износа, %	$И \leq 50$	$50 < И \leq 70$	$70 < И \leq 90$	$И > 90$
	Уровень готовности машин, %	$Г \geq 100$	$100 < Г \leq 80$	$80 < Г \leq 60$	$Г < 60$
	Доля технологической ренты, %	$Р_t \geq 15$	$10 < Р_t \leq 15$	$5 < Р_t \leq 10$	$Р_t \leq 5$
	Фондоотдача	$\Phi \geq 2$	$1,5 < \Phi < 2$	$1 < \Phi < 1,5$	$\Phi < 1$
	Темп роста себестоимости, %	$С \leq 100$	$100 < С \leq 200$	$200 < С \leq 300$	$С > 300$
2	Доля ренты по качеству торфа, %	$Р_k \leq 30$	$20 < Р_k \leq 30$	$10 < Р_k \leq 20$	$Р_k \leq 10$
	Темп увеличения объемов добычи, %	$Д \geq 100$	$90 < Д \leq 100$	$80 < Д \leq 90$	$Д \leq 70$
	Обеспеченность запасами, %	$О \geq 100$	$100 < О \leq 80$	$80 < О \leq 50$	$О < 50$
3	Уровень ликвидности	$Л \leq 1,5$	$1 < Л \leq 1,5$	$1,3 < Л \leq 1,5$	$Л < 1$
	Уровень платежеспособности	$П \geq 0,5$	$0,4 < П \leq 0,5$	$0,3 < П \leq 0,4$	$П < 0,3$
	Рентабельность продаж, %	$R_{\text{пр}} \geq 15$	$10 \leq R_{\text{пр}} < 15$	$5 \leq R_{\text{пр}} < 10$	$R_{\text{пр}} < 5$
	Рентабельность предприятия, %	$R_n \geq 20$	$15 \leq R_n < 20$	$10 \leq R_n < 15$	$R_n < 10$
4	Темп роста инвестиций в производство, %	$ИН \geq 100$	$80 \leq ИН < 100$	$60 \leq ИН < 80$	$ИН < 60$
	Уровень инвестирования, %	$УИ > 0,3$	$0,3 \leq УИ < 0,2$	$0,2 \leq УИ < 0,1$	$УИ < 0,1$
	Уровень деловой активности, %	$УД \geq 0,6$	$0,6 \leq УД < 0,4$	$0,4 \leq УД < 0,2$	$УД < 0,2$
	Уровень обновления техники, %	$УТ > 100$	$70 < УТ \leq 100$	$50 < УТ \leq 70$	$УТ < 50$
5	Темп роста ставок НДПИ по торфу, %	$РС \leq 1$	$1 < РС \leq 3$	$2 < РС \leq 4$	$РС > 4$
	Темп роста арендных ставок, %	$A \leq 5$	$5 < A \leq 10$	$10 < A \leq 15$	$A > 15$
	Ставка рефинансирования, %	$C \leq 8$	$8 < C \leq 10$	$10 < C \leq 12$	$C > 12$
6	Уровень текучести кадров, %	$T_k \leq 7$	$7 < T_k \leq 10$	$10 < T_k \leq 13$	$T_k > 13$
	Темп роста ср. зарплаты по предприятию, %	$T_{\text{зп}} \leq 110$	$100 \leq T_{\text{зп}} < 110$	$90 \leq T_{\text{зп}} < 100$	$T_{\text{зп}} < 90$
	Темп роста производительности рабочего, %	$ПР \geq 60$	$60 < ПР \leq 40$	$40 < ПР \leq 20$	$ПР < 20$
	Соотношение ср. зарплаты по предприятию к ср. зарплате по отрасли в регионе, раз	$ЗП \geq 0,6$	$0,4 \leq ЗП < 0,6$	$0,2 \leq ЗП < 0,4$	$ЗП < 0,2$
7	Темпы роста объема инновационной продукции, %	$T_{\text{ин}} \geq 60$	$40 < T_{\text{ин}} \leq 60$	$40 < T_{\text{ин}} \leq 20$	$T_{\text{ин}} < 20$
	Доля инновационной продукции в структуре ассортимента, %	$ИП \geq 50$	$50 < ИП \leq 30$	$30 < ИП \leq 10$	$ИП < 10$
...	...	...	...	...	...

Источник: составлено авторами по данным отчетности торфопредприятий Тверского региона.

Таблица 5

Влияние торфяной ренты на индикаторы хозяйственной деятельности предприятий по добыче торфа Тверского региона

Индикатор	«Торфяная компания»	«Диакар»	«ТЭК Тверь-регионторф»	«Тверская топливно-энергетическая компания»
Доля торфяной ренты в прибыли, %	40	23	15	10
Соотношение долей торфяной ренты (I и II рода), %	28/12	15/8	6/9	4/6
Доля влияния фактора на себестоимость, %:				
– геологическое качество торфа;	35	31	33	35
– метеоусловия сезона добычи торфа	15	15	15	15
Доля влияния уровня используемого оборудования на себестоимость, %	40	38	34	30
Доля влияния уровня используемой технологии на себестоимость, %	8	8	8	8
Соотношение собственных и заемных финансовых ресурсов, %	60/40	57/43	47/53	38/62

Источник: рассчитано авторами по данным отчетности торфопредприятий.

Особенностью методики оценки экономической безопасности является использование торфяной ренты в качестве основного индикатора технологической, ресурсной, финансовой и налоговой элементов безопасности производственно-хозяйственной деятельности предприятия по добыче торфа. Например, на рис. 2, 3 показана связь торфяной ренты с индикаторами экономической безопасности торфопредприятия, приведенными в табл. 4. Исследования некоторых показателей экономической безопасности, приведенных на рис. 2, 3, показывают, что себестоимость добычи торфа на 20 % выше для верхового торфа относительно низинного торфа, а выработка на низинной торфяной залежи на 15 % выше, чем на верховой залежи. Такая разница в показателях обусловлена различием в качестве ресурсного фактора (геологическое качество, конфигурация месторождения, погодные условия сезона добычи и др.). Экономическая безопасность торфопредприятий, использующих одинаковую технологию и оборудование, но разрабатывающих разные по геологическому качеству и природным условиям торфяные месторождения, будет отличаться на величину рентной составляющей доходов [1–3].

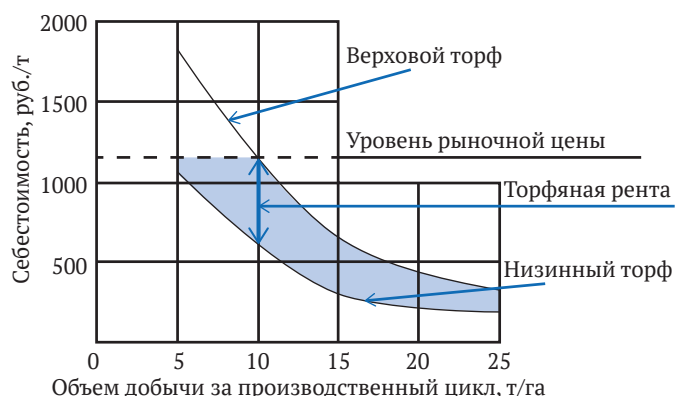


Рис. 2. Торфяная рента, себестоимость фрезерного торфа, цикловой сбор
(составлено авторами)

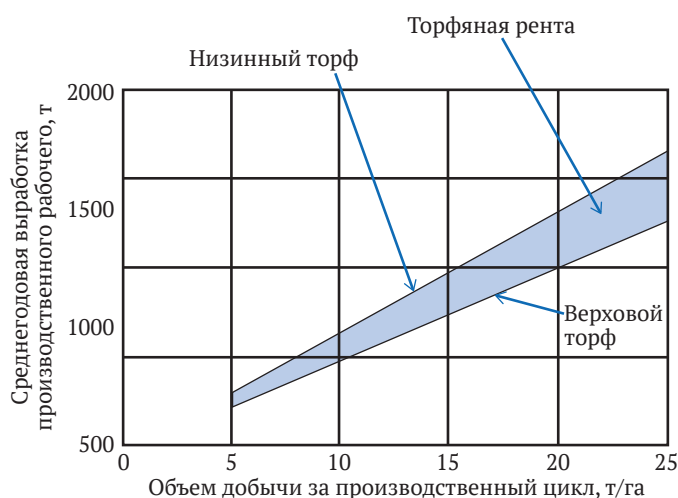


Рис. 3. Торфяная рента, среднегодовая выработка рабочего, цикловой сбор
(составлено авторами)

Результаты

Торфодобывающий комплекс в Тверской области в 2019 г. представлен 4 предприятиями, которые в совокупности разрабатывают 6 месторождений торфа (4 – низинных и 2 – верховых типов торфов). Несмотря на то что в Тверской области расположены самые большие запасы торфяных ресурсов по Центральному федеральному округу РФ, оценивающиеся в 2,08 млрд т (в пересчете по 40%-ной влажности), темпы добычи этого ресурса весьма незначительны – не более 100 тыс. т, а результаты хозяйственной деятельности этих предприятий за 2019 г. не позволяют решить проблему кризисного состояния торфяной отрасли региона.

Как показано на рис. 4, два из четырех торфопредприятий в 2019 г. получили убытки от хозяйственной деятельности, и это при одинаковых экономических, технологических, погодных условиях и налоговых режимах. Но здесь следует учесть тот факт, что в структуре минерально-сырьевой (ресурсной) базы «ТЭК Тверьрегионторф», «Диакар» и «Торфяная компания» от 50 до 70 % составляют запасы низинных типов торфяных месторождений. Особенности влияния торфяной ренты на результаты хозяйственной деятельности представлены в табл. 5 (на основании исследований авторов).



Рис. 4. Выручка и прибыль торфодобывающих предприятий Тверского региона за 2019 г.
(составлено авторами)

Данные табл. 5 показывают, что, несмотря на одинаковую технологию добычи торфа и условия сезона добычи в 2019 г., индикаторы результатов хозяйственной деятельности очень сильно различаются. Величина и соотношение рентных доходов в торфодобыче либо увеличивают прибыль, либо снижают убытки. Однако на показатель торфяной ренты оказывает сильное влияние стадия жизненного цикла разработки месторождения. Так, для «Топливо-энергетической компании» доля торфяной ренты самая незначительная – 10 % от прибыли, потому что добыча торфа проводится на стадии «падающей добычи», когда месторождение начинает истощаться, а запасы выработаны на 67 %. Результат расчетов оценки экономической безопасности по методике приведен в табл. 6.



Таблица 6

Экономическая безопасность торфопредприятий

Предприятие	Годы		
	2017	2018	2019
«Торфяная компания»	5,2	8,4	10,2
«Диакар»	9,6	12,4	14,7
«ТЭК Тверьрегионторф»	10,5	15,2	19,1
«Тверская топливно-энергетическая компания»	16,2	20,3	25,5

Источник: рассчитано авторами по данным отчетности торфопредприятий.

Анализ данных, приведенных в табл. 6, показал, что экономическая безопасность всех четырех торфопредприятий к 2019 г. ухудшается. В относительной безопасности находится «Торфяная компания», однако следует отметить, что у этого предприятия самая качественная ресурсная база с преобладанием низинных торфов. Проведенная диагностика экономической безопасности позволила определить главные проблемы кризисного состояния торфодобывающих производств Тверского региона (табл. 7).

Таблица 7

Проблемы экономической безопасности торфопредприятий

Предприятие	Проблемы экономической безопасности
«Торфяная компания»	1. Снижение объемов добычи торфа; 2. Отсутствие свободных финансовых средств; 3. Неоптимальная структура технологического парка; 4. Проблемы сбыта торфопродукции
«Диакар»	1. Средний износ техники; 2. Снижение объемов добычи торфа; 3. Отсутствие свободных финансовых средств; 4. Снижение ликвидности; 5. Проблемы сбыта торфопродукции
«ТЭК Тверьрегионторф» [22–25]	1. Большой процент износа техники; 2. Неоптимальная структура технологического парка; 3. Снижение объемов добычи торфа; 4. Отсутствие свободных финансовых средств; 5. Потеря ликвидности; 6. Проблемы сбыта торфопродукции; 7. Низкое качество ресурсной базы
«Тверская топливно-энергетическая компания»	1. Большой процент износа техники; 2. Снижение объемов добычи торфа; 3. Отсутствие свободных финансовых средств; 4. Неоптимальная структура технологического парка; 5. Потеря ликвидности; 6. Проблемы сбыта торфопродукции; 7. Истощение ресурсной базы

Источник: составлено авторами.

Не чувствуя реальной поддержки региональных властей, торфодобывающие предприятия разрабатывают стратегию антикризисного развития и в качестве первостепенных антикризисных мер применяют упрощенную систему налогообложения

и регистрируются как микропредприятия. Эти меры помогают снизить налоговое бремя, но их явно недостаточно для снижения угроз экономической безопасности. Неоднозначны и данные статистики по региону в части добычи полезных ископаемых. Так, до 2016 г. в Тверской области проводилась добыча топливно-энергетических ресурсов (топливного торфа), а с 2017 г. данные по торфодобывающим предприятиям отсутствуют, при этом доли убыточных предприятий в данном виде хозяйственной деятельности нет. Хотя в архивах арбитражного суда Тверского региона имеется достаточное число дел о банкротстве торфодобывающих предприятий.

Заключение

Так как диагностика и оценка экономической безопасности предприятий торфяной отрасли Тверского региона позволили утверждать, что все торфодобывающие предприятия сталкиваются с практически одинаковым набором проблем, то для снижения угроз потери экономической безопасности можно предложить следующую программу антикризисных мероприятий:

- Для повышения технологической безопасности:
 - повышение качества технологического оборудования посредством модернизации техники;
 - контроль своевременного проведения и качества сервисного сопровождения техники;
 - совершенствование используемой технологии добычи торфа или отдельных операций технологического цикла;
 - оптимизация структуры парка торфодобывающей техники;
 - внедрение технологий глубокой и комплексной переработки торфяного сырья;
 - внедрение новых подходов к планированию технологической добычи и переработки торфа «полного цикла»;
 - использование автоматизированных и информационных технологий управления бизнес-процессами;
- Для повышения финансовой безопасности:
 - оптимизация налоговых платежей и режимов;
 - повышение эффективности производства;
 - оптимизация производственных расходов, контроль себестоимости добычи торфа;
 - внедрение информационных технологий анализа экономического и финансового состояния торфопредприятий;
- Для повышения кадровой безопасности:
 - оптимизация структуры кадров;
 - совершенствование систем оплаты труда;
 - стимулирование роста производительности и качества труда;
- Для повышения инвестиционной безопасности:
 - мониторинг инвестиционных проектов на соответствие выбранной стратегии развития торфопроизводства;
 - систематическое проведение комплексного маркетингового анализа рынка торфопродукции и торфодобывающего оборудования;



– мониторинг соотношения собственного капитала торфопредприятий и заемного.

Авторский подход к диагностике и оценке экономической безопасности предприятий торфяной отрасли позволит полностью переосмыслить суще-

ствующие методики проектирования торфодобывающих производств и разработать рекомендации для повышения гибкости и адаптивности торфодобывающих предприятий с учетом индивидуальных условий их работы.

Список литературы

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. P. 497–501.
2. Яконовская Т. Б., Жигульская А. И., Жигульский М. А. Анализ инвестиционно-инновационной активности в торфяной отрасли. В: *Современное состояние экономических систем: экономика и управление. Сб. науч. тр. Междунар. науч. конф. 4–5 декабря 2018 г.* Тверь: СКФ-офис; 2018. С. 148–153.
3. Акимова Т. А. *Основы экономики устойчивого развития*. М.: Экономика; 2013. 332 с.
4. Михеева Н. Н. *Региональная экономика и управление*. Хабаровск: РИОТИП; 2000. 400 с.
5. Яконовская Т. Б., Жигульская А. И., Зюзин Б. Ф. Экономическая классификация способов разработки торфяного месторождения: рентный подход. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2014;(7):318–323.
6. Гайфуллина М. М., Костомарова Е. В. Методический подход к оценке экономической безопасности нефтяной компании. *Науковедение*. 2017;9(2). URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/64EVN217.pdf> (дата обращения: 08.07.2020).
7. Плужников В. Г., Кухаренко С. И., Шикина С. А. Диагностика как инструмент обеспечения экономической безопасности предприятия. *Вестник ЮУрГУ. Серия «Экономика и менеджмент»*. 2017;11(1):36–44. <https://doi.org/10.14529/em170105>
8. Токарь Е. В., Сердюк Л. Е. Диагностика как инструмент обеспечения экономической безопасности предприятия. В: *Современная экономика: актуальные вопросы, достижения и инновации. Материалы XI Междунар. науч.-практ. конф. (25 ноября 2017 г.): в 2 ч.* Пенза: «Наука и Просвещение»; 2017. Ч. 1. С. 19–31.
9. Выборова Е. Н. Методологические особенности сравнительной диагностики экономического состояния субъектов хозяйствования. *Экономический анализ: теория и практика*. 2007;24(105):15–19.
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. Богданов В. Д., и др. Модель корреляции между экономическим развитием и экологической результативностью на основе данных нефинансовой отчетности компании. *Экономика региона*. 2016;12(1):93–104. <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. Бендигов М. А. Экономическая безопасность промышленного предприятия в условиях кризисного развития. *Менеджмент в России и за рубежом*. 2000;(2):19–29.
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. Акбердина В. В., Гребенкин А. В., Смирнова О. П. Комплексный инструментальный оценки экономической безопасности отраслей экономики: региональный аспект. *Экономика региона*. 2017;13(4):1264–1279. <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>

References

1. Mikhailov A., Zhigul'skaya 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., Zhigul'skaya A. I., Zhigul'sky 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., Zhigul'skaya 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., Kukharensky 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., Baldesku 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>

Информация об авторах

Татьяна Борисовна Яконовская – к.э.н., доцент, кафедра экономики и управления производством, Тверской государственный технический университет, г. Тверь, Россия; ORCID: [000-0003-0604-0129](https://orcid.org/000-0003-0604-0129); SCOPUS ID: [57196258982](https://orcid.org/57196258982); e-mail: tby81@yandex.ru

Александра Ивановна Жигульская – к.т.н., доцент, кафедра технологических машин и оборудования, Тверской государственный технический университет, г. Тверь, Россия; ORCID: [0000-0003-4350-7314](https://orcid.org/0000-0003-4350-7314); SCOPUS ID: [57196259021](https://orcid.org/57196259021); e-mail: 9051963@mail.com

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

Поступила в редакцию 17.09.2020

Поступила после рецензирования 16.11.2020

Принята к публикации 29.01.2021

Received 17.09.2020

Revised 16.11.2020

Accepted 29.01.2021



ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ В МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОМ КОМПЛЕКСЕ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-1-16-22>

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>

SAFETY IN MINING AND PROCESSING INDUSTRY AND ENVIRONMENTAL PROTECTION

Research article

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>

Введение

Многолетний опыт исследований российских и зарубежных ученых свидетельствует о негативном воздействии горно-обогатительных комбинатов, как действующих, так и закрытых [1–4], на объекты окружающей среды и человека. Загрязнение окружающей среды соединениями тяжелых металлов (Cr, Cd, Pb и As) в горнодобывающих районах, где существуют и горная промышленность, и сельское хозяйство, вызывает серьезную обеспокоенность во всем мире [5–16]. Исследования зарубежных ученых в Южной Африке, Мексике, Китае показали высокие уровни загрязнения металлами почв, сельскохозяйственных растений и микробного сообщества [5–9]. Xu Zhang et al., проанализировав особенности миграции Fe, Mn, Cr, Pb, подчеркнули высокий уровень содержания данных элементов в почвах, растениях, отмечая их высокую фитотоксичность, значительное ухудшение при этом качества воды. Биодоступные формы тяжелых металлов вызывают большие экологические риски, угрожая в конечном итоге здоровью человека [8]. Karaca O. и др. отмечают, что загрязнение тяжелыми металлами может повлиять на биоразнообразие и экономическое благосостояние региона исследований [6]. Ying-Nan Huang et al. отмечают, что дети более чувствительны, чем взрослые, к воздействию металлов Cd и Cr, что отражено в значениях HI и CR, превышающих допустимый уровень [5, 9].

За последнее время в Дальневосточном федеральном округе (ДФО), в том числе в Приамурье, были закрыты горнодобывающие предприятия, в том числе оловорудные, что привело к серьезным экологическим проблемам. Так, закрытый ныне «Солнечный

ГОК» долгие годы являлся одним из крупнейших горнопромышленных предприятий Дальнего Востока. Оловорудное месторождение в центральной части Хабаровского края обрабатывалось в течение десятиков лет, начиная с середины прошлого века. После прекращения добычи и закрытия горнодобывающего предприятия негативное воздействие на окружающую среду и прилегающую территорию может продолжаться в течение длительного времени. К основным видам такого воздействия относятся разрушение ландшафта и почвенно-растительного покрова, изменение состояния и состава подземных и поверхностных вод, уменьшение биоразнообразия, выход опасных веществ на дневную поверхность.

В настоящее время возникла необходимость организации комплексного экологического мониторинга изменения экосистем, а также прогноза влияния техногенных объектов для разработки мероприятий, направленных на снижение негативных последствий, вызванных многолетней горнопромышленной деятельностью горных предприятий, и устранение накопленного вреда окружающей среде (отходов переработки минерального сырья) в оловодобывающих районах Дальнего Востока, в том числе в Приамурье. В связи с этим целью исследования явилась оценка влияния соединений Pb, Cd, Cr и As на окружающую среду и здоровье населения горняцкого поселка Солнечный для обеспечения экологической безопасности. 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 соединениями



токсичных элементов в границах влияния закрытых горнорудных предприятий; 3) разработка предложений по снижению влияния горного техногенеза на состояние экосистемы и здоровье человека.

Объекты и методы исследования

Объектами являются природно-горнопромышленные системы, сформировавшиеся в прошлом веке благодаря деятельности Солнечного горно-обогатительного комбината. Потенциальным источником техногенного загрязнения являются отходы переработки оловорудного сырья. Для количественного анализа состава проб (отходов переработки оловорудного сырья, почв, растительности, биологического материала) был использован метод атомно-абсорбционного анализа по методике измерений содержания металлов в твердых объектах методом спектрометрии с источником ионов в виде индуктивно связанной аргоновой плазмы. На масс-спектрометре (ICP-MS Elan 9000, Канада) определялось количественное содержание соединений тяжелых металлов и мышьяка [17]. Согласно руководству по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду [18], для определения величин популяционных канцерогенных рисков (*PCR*), отражающих дополнительное число случаев злокачественных новообразований, способных возникнуть на протяжении жизни вследствие воздействия исследуемого фактора, проводится расчет по формуле

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

где *CR* – индивидуальный канцерогенный риск, *POP* – численность исследуемой популяции, чел.

Расчет дополнительной вероятности развития онкологического заболевания у индивидуума на протяжении всей жизни (*CR*) выполнен по формуле

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

где *LADD* – среднесуточная доза поступления элемента в течение жизни, мг/(кг · день); *SF* – фактор канцерогенного потенциала, (кг · день)/мг.

Среднесуточная доза поступления элемента в организм человека в течение жизни рассчитывается по формуле

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

где *Ca* – концентрация вещества в атмосферном воздухе, мг/м³; *Tout* – время, проводимое вне помещения, ч/день; *Vout* – скорость дыхания вне помещения, м³/ч; *Ch* – концентрация вещества в воздухе помещения, мг/м³; *Tin* – время, проводимое внутри помещения, ч/день; *Vin* – скорость дыхания внутри помещения, м³/ч; *EF* – частота воздействия, дней/год; *ED* – продолжительность воздействия, лет; *BW* – масса тела человека, кг; *AT* – период усреднения экспозиции, лет.

Результаты и обсуждение

Специфика добычи и обогащения оловянной руды на исследуемом горном предприятии заключалась в извлечении и переработке огромного объема горной массы, использовалась лишь небольшая часть,

а остальная накапливалась в виде техногенных отходов, так называемых хвостов, размещенных в специальном сооружении – хвостохранилище. Этот гидротехнический объект был спроектирован и введен в действие в 1969 г. В процессе добычи руды произошло формирование новых, не свойственных данной территории техногенных форм. За время деятельности ГОКа в нем накоплено около 16 млн м³ отходов [1]. В 2001 г. в результате прекращения деятельности предприятия хвостохранилище центральной обогатительной фабрики Солнечного ГОКа было осушено, но его поверхность, вопреки законодательству РФ, согласно которому недропользователь обязан провести консервацию техногенного объекта, не была своевременно рекультивирована.

Миграция химических элементов и их соединений в результате сложных физико-химических процессов преобразования минералов, содержащихся в отходах, происходящая в приповерхностной части литосферы, в условиях повышенной аэрации является одной из основных причин экологического загрязнения экосферы. В настоящее время хвостохранилище закрытого Солнечного ГОКа является мощным источником пылевыделения, интенсивного техногенного загрязнения токсичными элементами объектов окружающей среды [2, 3]. На поверхности и в толще хвостов, особенно в засушливое время, появляются налеты, тонкие корочки и пленки техногенных минералов из классов сульфатов, карбонатов, силикатов, арсенатов и др. [1]. В результате процесса гипергенеза и техногенеза в отходах горнорудного производства формируются высокоминерализованные растворы, содержащие большое количество соединений тяжелых металлов [4]. Они попадают в поверхностные, грунтовые воды и разносятся на большие расстояния, загрязняя компоненты среды [3, 4].

На современном этапе недостаточно изучена роль техногенного загрязнения в формировании экологической обусловленности ряда заболеваний человека. Необходимо отметить, что горняцкий поселок Солнечный расположен в 3 км от данного хвостохранилища. Население проживает в условиях постоянного превышения нормативных показателей содержания загрязняющих веществ, в том числе в атмосферном воздухе [3, 4].

Многочисленные исследования свидетельствуют о том, что детское население более чувствительно к влиянию неблагоприятных факторов окружающей среды [5, 9, 10].

Исследования в области влияния оловорудной промышленности на природные компоненты свидетельствуют о том, что проблема загрязнения экосферы является одной из самых актуальных, особенно в границах влияния закрытых горных предприятий Дальневосточного федерального округа. Вопросы защиты окружающей среды представляют сложную эколого-экономическую задачу, включающую необходимость разработки и реализации ряда природоохранных мероприятий, обеспечивающих минимизацию негативного влияния отходов горного производства на все природные составляющие и человека [4], в том



числе организация экологического мониторинга. Он направлен на решение задач, обозначенных в ФЗ № 7 «Об охране окружающей среды» [19]. В соответствии с ФЗ № 7 цели экологического мониторинга включают: 1) наблюдение за состоянием окружающей среды, в том числе в районах расположения источников антропогенного воздействия; 2) наблюдение за воздействием антропогенных источников на окружающую среду; 3) обеспечение потребностей государства, юридических и физических лиц достоверной информацией, необходимой для предотвращения и (или) уменьшения неблагоприятных последствий изменения состояния окружающей среды. В связи с этим существует необходимость создания и развития системы экологического мониторинга в исследуемом районе.

В рамках экологического мониторинга в результате многолетних исследований проводилось определение химического содержания соединений тяжелых металлов в отходах обогащения, почвах, растительности, снежном покрове, биологическом материале человека (волосах). Так, анализ минерального состава отходов подтверждает наличие в них высокого содержания соединений тяжелых металлов, в том числе наиболее опасных. В соответствии с имеющимися на сегодняшний день классификациями к ним относятся и такие элементы, как хром (Cr), мышьяк (As), кадмий (Cd) и свинец (Pb). Из тела техногенного объекта в воздушный бассейн выделяется около его поверхности значительное количество газов. Загрязнение воздушного бассейна здесь можно отнести к экстремально высокому. Концентрация аэрозолей оказалась выше фоновой в 80 раз. Средневзвешенные концентрации соединений тяжелых металлов в снежном покрове в зимние сезоны оказались следующими (мг/дм³): Pb – 0,001; Cd – 0,002; Cr – 0,001.

Установлено превышение ПДК в почвах и растительности для соединений As, Cr, Pb. Кроме того, почвенный покров является депономом техногенного загрязнения. Почвы медленно реагируют на изменения в окружающей среде, однако фиксируют и аккумулируют токсичные элементы. В границах влияния хвостохранилища зафиксировано накопление растениями соединений Pb и Cr, Cd преимущественно в листьях и корнях растений.

Обследование образцов волос у детей от 3 до 14 лет горняцкого поселка Солнечный на содержание соединений химических элементов (As, Cr, Cd, Pb) свидетельствует о том, что в исследуемой группе детей отмечены следующие региональные особенности элементного статуса:

- у девочек наблюдается превышение по содержанию Cr в 3,5, Pb в 2,61 раза соответственно в сравнении с данными по России [20]. В порядке возрастания кратности превышения для данных элементов можно сказать, что кратность превышения содержания Pb < Cr. Не превышает средние показатели по России содержание элементов As (0,015 мг/кг), Cd (0,103 мг/кг);

- у мальчиков наблюдается превышение по содержанию только Cr в 1,54 раза. Не превышает средние показатели содержание элементов As (0,015 мг/кг) и Cd (0,103 мг/кг).

Особенностью элементного статуса детей в исследуемой группе являются высокие показатели содержания соединений тяжелых металлов Pb, Cr и As. Наши исследования подтверждают данные о том, что детский растущий организм активно адсорбирует токсичные элементы [21–24].

При анализе воздействия соединений элементов (As, Cr, Pb) как канцерогенных факторов при ингаляционном попадании в организм человека [18] в поселке Солнечный получили следующие данные по величине индивидуального и популяционного риска (табл. 1).

Таблица 1

Популяционные и индивидуальные канцерогенные риски для населения п. Солнечный

Элемент	Содержание в воздухе, мг/м ³	SF, (мг/(кг · ч день)) ⁻¹	LADD, мг/кг день	CR	PCR
As	0,0032	15	$4,7 \cdot 10^{-5}$	$7,05 \cdot 10^{-4}$	9
Cr	0,0017	42	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$1,05 \cdot 10^{-3}$	12
Pb	0,0028	0,042	$4,2 \cdot 10^{-5}$	$1,76 \cdot 10^{-6}$	< 1

В соответствии с критериями приемлемости риска, обусловленного воздействием загрязняющих веществ, индивидуальный канцерогенный риск по хрому $CR = 1,05 \cdot 10^{-3}$ относится к четвертому диапазону (индивидуальный риск в течение всей жизни, равный или более $1 \cdot 10^{-3}$), он неприемлем ни для населения, ни для профессиональных групп. Данный диапазон обозначается как De manifestis Risk, и при его достижении необходимо давать рекомендации для лиц, принимающих решения, о проведении экстренных оздоровительных мероприятий по снижению риска [18]. По мышьяку значение популяционного риска ($CR = 7,05 \cdot 10^{-4}$) превышает приемлемое значение для населения. По соединениям свинца индивидуальный канцерогенный риск является допустимым ($CR = 1,76 \cdot 10^{-6}$). Для снижения негативного влияния на экосферу хвостохранилищ, содержащих токсичные отходы, предложены технологические решения, новизна которых подтверждена патентами РФ (2017, 2019) [25, 26].

Заключение

Результаты исследования свидетельствуют о том, что состояние окружающей среды в границах закрытого оловорудного предприятия Солнечный ГОК в Приамурье оценивается как критическое.

Улучшение состояния сложившейся ситуации в границах влияния закрытого оловорудного предприятия возможно при формировании центра экологического мониторинга в районе исследования, основной задачей которого является обеспечение комплексного подхода к контролю содержания токсичных элементов в компонентах биосферы; организация эффективной системы сбора, обработки и передачи результатов мониторинга, а также прогноза. Созданы новые методы, направленные на обеспечение экологической безопасности отходов переработки минерального сырья, новизна которых подтверждена патентами (2017, 2019) [25, 26].



Список литературы

1. Зверева В. П., Костина А. М., Коваль О. В. Техногенное минералообразование как показатель экологического состояния оловорудных районов Дальнего Востока. *Горный журнал*. 2009;(4):41–43.
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. Крупская Л. Т., Грехнев Н. И., Новороцкая А. Г., Уткина Е. В., Крупский А. В., Растанина Н. К. Особенности миграции токсичных химических элементов в компонентах природной среды в зоне влияния хвостохранилища ЦОФ ОАО «Солнечный ГОК». *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2010;(S4):349–361.
4. Новороцкая А. Г., Крупская Л. Т., Грехнев Н. И., Яковенко Г. П. О результатах экологического мониторинга воздушной среды на горных объектах Солнечного ГОКа. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2007;(S15):248–258.
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. P. 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. P. 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. ПНД Ф 16.1:2.3:3.11–98. Количественный химический анализ почв. Методика выполнения измерений содержания металлов в твердых объектах методом спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой. М.; 1998. 30 с.
18. Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду. М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России; 2004. 143 с.
19. ФЗ РФ от 10.01.2002 № 7-ФЗ (ред. от 27.12.2019) «Об охране окружающей среды».
20. Скальный А. В. Референтные значения концентрации химических элементов в волосах, полученные методом ИСП-АЭС. *Микроэлементы в медицине*. 2003;4(1):55–56.



21. Ревич Б. А., Авалиани С. Л., Тихонова Г. И. *Окружающая среда и здоровье населения: Региональная экологическая политика*. М.: ЦЭПР; 2003. 149 с.
22. Вельтищев Ю. Е. Фокеева В. В. *Экология и здоровье детей. Химическая экотология*. М.: Моск. НИИ педиатрии и дет. хирургии; 1996. 57 с.
23. Растанина Н. К., Крупская Л. Т. О роли экологических факторов в изучении здоровья населения горняцких поселков на юге Дальнего Востока. *Экология и промышленность России*. 2008;(12):56–57.
24. Крупская Л. Т., Растанина Н. К. Оценка риска для здоровья населения, связанного с загрязнением атмосферного воздуха в районе хвостохранилища ЦОФ Солнечного ГОКа. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2007;(S15):318–323.
25. Андроханов В. А., Крупская Л. Т., Беланов И. П. *Способ закрепления поверхности хвостохранилища*. Заявка № 20161500344 от 20.12.2016. РФ, опубл. 21.08.2017, бюл. 24. МПК В0 9С 1/08.
26. Крупская Л. Т., Ищенко Е. А., Голубев Д. А., Колобанов К. А., Растанина Н. К. Патент РФ № 2707030 от 21.11.2019. *Состав для снижения пылевой нагрузки на экосферу и рекультивации поверхности хвостохранилища*. Заявка № 2019114495 от 13.05.2019.

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. Androkhov 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.).

Информация об авторах

Наталья Константиновна Растанина – к.б.н., доцент, кафедра химии и химических технологий, Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск, Россия; Scopus ID: [56857552500](#); e-mail: n.rastanina@yandex.ru

Константин Александрович Колобанов – Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск, Россия; Scopus ID: [57211208606](#)

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](#)

Поступила в редакцию 23.05.2020

Поступила после рецензирования 12.09.2020

Принята к публикации 05.02.2021

Received 23.05.2020

Revised 12.09.2020

Accepted 05.02.2021



СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД. ГЕОМЕХАНИКА И ГЕОФИЗИКА

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-1-23-30>**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 $t_{\text{квант}} = 1 \text{ мкс} - 40 \text{ мкс}$ 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>

MINING ROCK PROPERTIES. ROCK MECHANICS AND GEOPHYSICS

Research article

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 citation

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>

Введение и постановка проблемы

Перспективный подход к повышению геологической эффективности сейсмических и акустических методов исследования опирается на новые знания в физике деформирования горных пород. Под этим подразумевается глубокое изучение механизмов распространения и затухания упругих волн на микро- и наноуровне. К списку малоизвестности знаний можно отнести свойство микропластичности горных пород, которое проявляется при малых деформациях. Интересы в науках о Земле охватывают большой частотный диапазон квазистатических и динамических напряжений и деформаций.

Динамические характеристики пород при сейсмических воздействиях были изучены на больших и умеренных деформациях [1]. С изучением нелинейных эффектов в сейсмике [2–7] вопрос о границе «упругость–неупругость» стал более актуальным. С учетом (исходя из) экспериментальных данных уровень деформации этой границы был постепенно сдвинут от $\sim 10^{-2}$ – 10^{-3} в сторону меньших деформаций до $\sim 10^{-6}$. Таким образом, было показано, что нелинейные эффекты в горных породах возможны даже при малых деформациях. Это расширяет действие неупругих процессов на область практического применения, где используют волны малой интенсивности.

В настоящее время теоретические исследования в сейсмике опираются на классическую вязкоупругую модель стандартного линейного тела, которая хорошо описывает дисперсию, релаксацию и связанные с нею неупругие процессы [8, 9]. Однако эта модель не учитывает такой нестандартный эффект, как амплитудная зависимость скоростей волн и затухания, который

обнаружен во многих экспериментах при распространении сейсмических и акустических волн в горных породах [10–13]. В основном это лабораторные эксперименты на образцах твердых пород, извлеченных с больших глубин. Экспериментальные данные показывают, что с увеличением амплитуды излучаемого сигнала наблюдается уменьшение скорости волны и увеличение затухания [9, 14, 15]. Другие эксперименты также подтверждают представленные выше данные, но одновременно имеют и противоположный результат. С увеличением амплитуды сигнала может происходить как увеличение, так и уменьшение скорости волны, и затухания [6, 11]. Необычное поведение скоростей волн распространяется на поведение модуля упругости. Уменьшение или увеличение модуля упругости происходит в соответствии с кривизной соотношения напряжение–деформация [16–20].

Микропластическая неупругость горных пород была обнаружена в квазистатических экспериментах на различных образцах [19]. Микропластичность металлов, сплавов и других материалов была известна. Ее проявления на диаграмме «напряжение–деформация» представлены в виде «стресс-плато» и «стресс-падение» (the stress-plateau and the stress-drop) [21–24]. Это свойство можно охарактеризовать как некоторое нерегулярное кратковременное «включение» пластичности внутри упругой области деформирования [16, 25–27]. Это положение имеет также теоретическое подтверждение [28, 29]. Ниже представлены результаты исследования амплитудной зависимости скорости продольной волны в породах, полученные с использованием различной аппаратуры в различных условиях проведения эксперимента.



Методики исследования и фактический материал

Полевые исследования

Полевые измерения проведены в зоне малых скоростей в суглинках. В верхней части до глубины 8,5 м породы частично водонасыщенны. Скорость продольных волн составляет около 340 м/с. Ниже располагается водоносный горизонт, скорость волны в котором ~1500 м/с. Измерения проведены методом межскважинного просвечивания, расстояние между скважинами составляет 7 м. В первой расстановке излучатель установлен на глубине 2 м, а приемник сигналов на глубине 10 м (2 м – 10 м). Волна проходит преимущественно через частично водонасыщенную породу. На второй расстановке излучатель и приемник находятся на глубине (10 м – 10 м), волна распространяется в полностью насыщенной водой породе.

Излучатель сейсмического сигнала состоит из набора пьезоэлектрических шайб, размещенных в корпусе с предварительным усилителем [4, 30]. Излучение сигнала происходит через жидкостную прокладку и герметичную эластичную оболочку, которая контактирует со стенкой скважины. Амплитуда импульса на пьезоэлектрическом преобразователе излучателя изменялась от 350 до 950 В. Использовался датчик ПДС-21, который имеет коэффициент преобразования 100 мкВ/Па. Приемник сигналов контактировал со стенками скважины через эластичную прокладку с жидкостью. Регистрация осуществлялась с накоплением сигнала до 128. Цифровая запись сигналов осуществлялась на компьютере. Точность измерения времени распространения импульса составляла ~0,02 %. Время квантования записи $t_{\text{квант}} = 8$ мкс и 40 мкс. Диапазон амплитуды деформации $(3,8 - 9,8) \times 10^{-8}$.

Лабораторные измерения

в низком килогерцовом диапазоне частот

Эксперименты выполнены на образце песчаника цилиндрической формы диаметром 76 мм и длиной 1 м. Плотность породы – 2,0 г/см³, пористость около 3 %. Скорость распространения продольной волны (2910–3000) м/с. Эксперимент проводился при комнатной температуре на пяти величинах амплитуды деформации $(0,3 - 1,67) \times 10^{-6}$.

Излучатель и приемник акустических сигналов, состоящий(е) из пьезокерамических шайб (ЦТБС-3), жестко закреплены на одном конце стержня. На другом конце образца таким же образом жестко закреплена латунная шайба толщиной 3 мм. Вся конструкция через домкрат вставлена в проем стены. Акустический импульс частотой 6835 Гц, пройдя вдоль стержня, отражается от противоположного торца и поступает на приемник и через усилитель на цифровое регистрирующее устройство. Время квантования АЦП регистратора составляет 1 мкс. Точность измерения скорости волны – 0,05 %. Относительная точность измерения, определяемая при вариации амплитуды и постоянстве остальных условий, намного выше.

Лабораторные измерения на частоте около 1 МГц

Исследования проводились на образцах сухого песчаника цилиндрической формы длиной 2,4 см

и 4,0 см в диаметре. Мелкозернистый песчаник с присутствием алевролита отобран из скважины с глубины 2920 м. Плотность породы 2,36 г/см³, общая пористость – 13 %. Измерительная установка представляет из себя трехслойную модель. Первый и третий слои (бериллиевая бронза) обеспечивают идентичное отражение волны на границах раздела. Первый слой играет роль линии задержки, а третий слой – акустической нагрузки. Образец породы находится между этими слоями. Возбуждение и прием сигналов обеспечивают пьезокерамические датчики на частоте ~1 МГц, которые поляризованы на продольную волну. Контролируемое статическое давление (20 МПа) обеспечивает постоянство контакта на границах слоев.

Результаты исследований

Полевой эксперимент

Поведение скорости продольной волны в зависимости от амплитуды деформации в суглинках представлено для двух позиций расположения источника и приемника: расстановки (2 м – 10 м) и (10 м – 10 м). На рис. 1, а показана зависимость скорости продольной волны от амплитуды при расположении источника на глубине 2 м, а приемника на 10 м. Величина амплитуды излучаемого сигнала изменялась дискретно по замкнутому циклу. Увеличение амплитуды идет от A1, A2, A3 до A4 (восходящий полуцикл), а затем ее уменьшение по тем же значениям до A1 (нисходящий полуцикл) – и получаем комплект цифровых записей в полном цикле.

Поведение скорости продольной волны в суглинках в зависимости от амплитуды деформации является сложным. В первом полуцикле курса амплитуды скорость волны сначала уменьшается, а затем нелинейно увеличивается. Во втором полуцикле идет немонокотное возрастание скорости волны. Наибольшее изменение скорости волны в цикле составляет 1,7 %. Имеется явное расхождение «путей» скорости волны между восходящим и нисходящим полуциклами. В диапазоне A2 – A4 скорость волны вместо понижения возрастает. По завершении полного цикла имеется незамкнутая петля гистерезиса, которая составляет 0,7 %. Это эффект амплитудно-зависимого гистерезиса скорости продольной волны.

Рассмотрение сейсмической записи показывает наличие нестандартных осложнений на форме волны, которые были опознаны как признаки микропластической деформации. Отдельные фрагменты импульсов, записанных на трех величинах амплитуды, представлены на рис. 1, б. Это встроенные кратковременные амплитудные плато, протяженность которых составляет от одного до нескольких $t_{\text{квант}} = 40$ мкс. Мгновенное значение амплитуды импульса на длине плато не изменяется. Эти плато прерывают «нормальный» курс амплитуды, т.е. процесс упругого деформирования и переход к микропластическому течению. Протяженность плато достигает двенадцати квантов, что составляет 480 мкс. Увеличение количества плато приводит к уменьшению крутизны фронта импульса и его затягиванию. Зависимость скорости продоль-



ной волны от амплитуды деформации в суглинках на расстановке (10 м – 10 м) представлена на рис. 2, а. С увеличением амплитуды от A1 до A4 скорость продольной волны нелинейно возрастает на 0,34 %. Здесь, в отличие от предыдущей расстановки, амплитудный гистерезис отсутствует. Это интересный показатель распространения волны в полностью водо-насыщенных суглинках. Цифровые записи также показывают отсутствие плато на форме волны (рис. 2, б).

Лабораторный эксперимент

на низких килогерцовых частотах

Скорость продольной волны в песчанике в зависимости от восходящей и нисходящей амплитуды деформации представлена на рис. 3, а. При увеличении амплитуды от A1+ до A5+ наблюдается увеличение, а затем уменьшение скорости волны. При уменьшении амплитуды от A5+ до A1– скорость волны с большим с провалом возрастает и наблюдается незамкну-

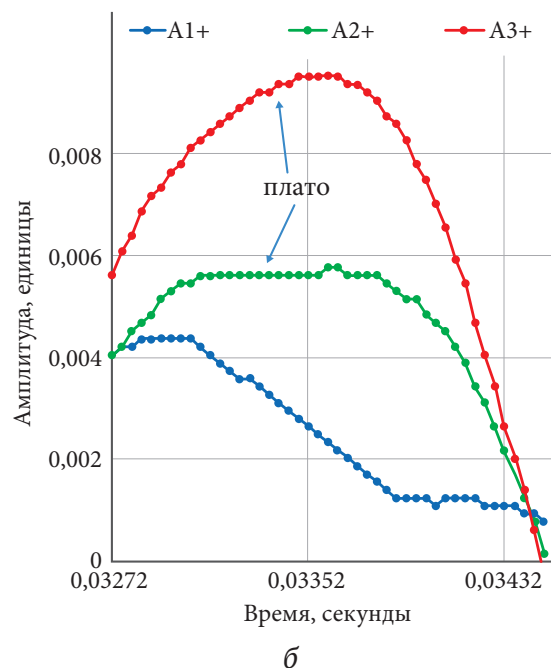
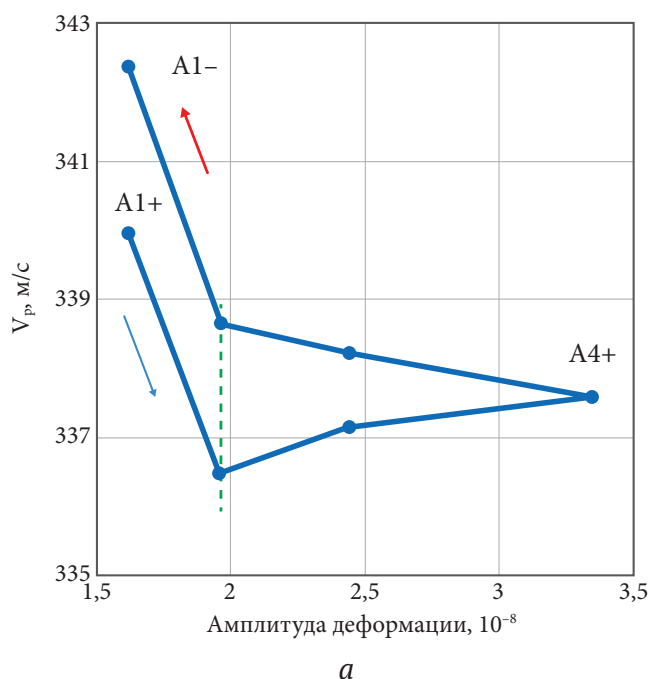


Рис. 1. Скорость продольной волны в суглинках в зависимости от амплитуды деформации: источник на глубине 2 м, приемник – на глубине 10 м (а); фрагменты импульсов с осложнениями в виде плато (б)

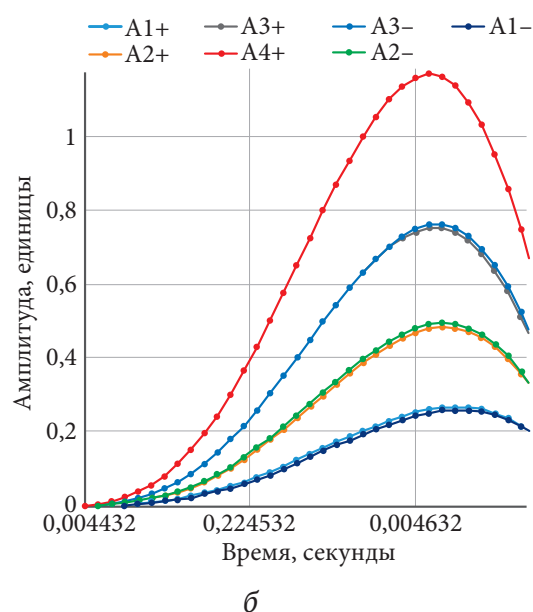
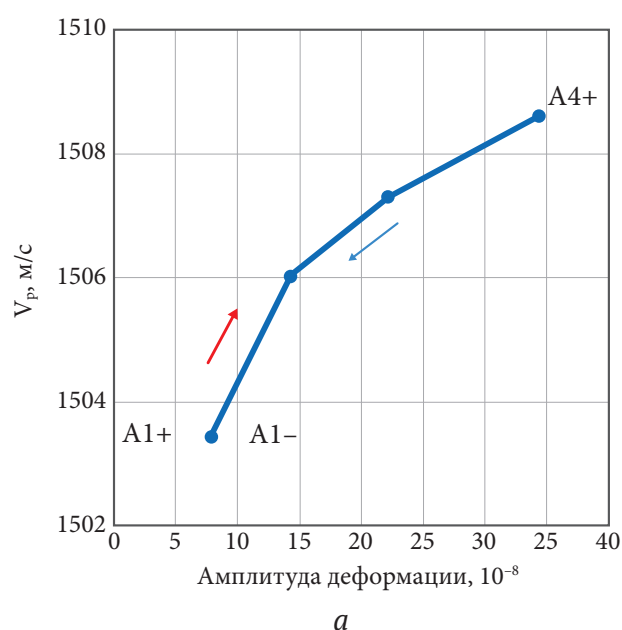


Рис. 2. Скорость продольной волны в зависимости от амплитуды деформации на расстановке источник-приемник 10 м – 10 м (а). Фрагменты фронта импульсов на амплитудах A1–A4 при расстановке h = 10 м – 10 м (б)

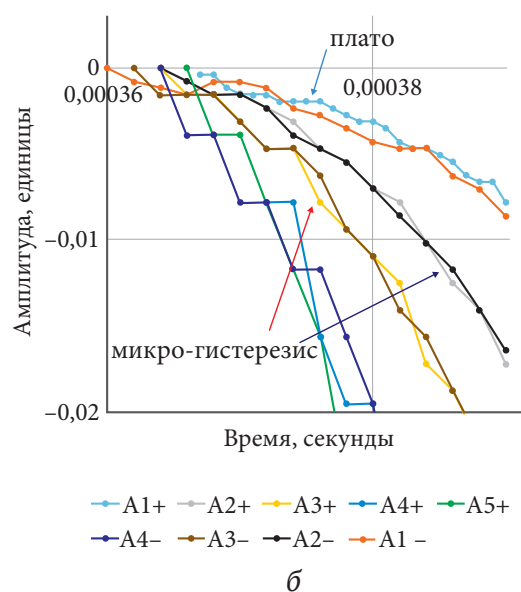
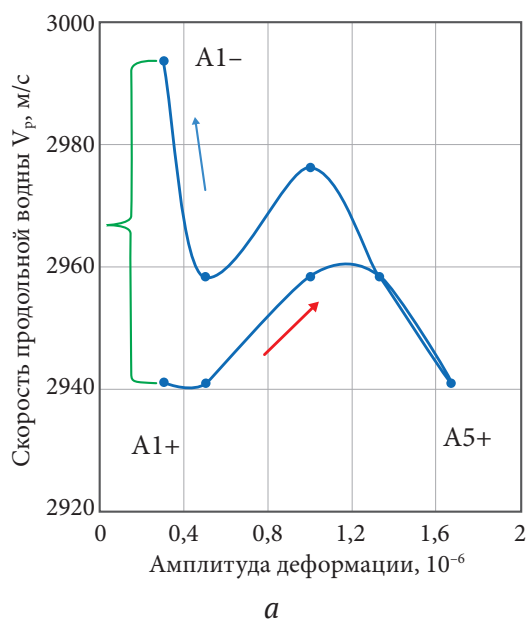


Рис. 3. Фрагменты фронта импульсов на амплитудах A1–A4 при расстановке $h = 10$ м – 10 м. Демонстрация плато (а). Фрагменты импульсов, зарегистрированных на пяти амплитудах, в области первых вступлений (б)

тый гистерезис, который составляет 1,8 %. На рис. 3, б показаны фрагменты фронта импульсов вблизи первого вступления для пяти значений восходящей и нисходящей амплитуды деформации. На акустических трассах присутствуют плато протяженностью более $t_{\text{квант}} = 2$ мкс. Эти встроенные плато изменяют общий наклон фронта импульса.

На профиле волны обнаружен микрогистерезис. Это кратковременное отклонение двух идентичных трасс (например, A1+ и A1–, A2+ и A2–, и т.д.) от общего амплитудного курса, рис. 3, б. При этом происходит изменение наклона фронта на небольшом участке, т.е. скорости деформирования. Такие участки микрогистерезиса чередуются с участками полного совпадения восходящего и нисходящего курса.

Лабораторный эксперимент на частоте около 1 МГц

Зависимость скорости волны от амплитуды деформации представлена на рис. 4. При повышении амплитуды величина скорости продольной волны изменяется волнообразно. При уменьшении амплитуды скорость волны нелинейно возрастает на 0,36 %. Амплитудный гистерезис составляет 0,48 %. Форма отраженных импульсов, зарегистрированных с наносекундным разрешением на шести величинах амплитуд при замкнутом цикле измерения, имеет сложную картину деформации. На рис. 5 представлен фрагмент фронта волны, где можно видеть нестандартные неупругие проявления в виде плато, локального падения амплитуды и микрогистерезиса. Протяженность этих осложнений составляет величину в несколько $t_{\text{квант}} = 32,5$ нс. Следует отметить, что записи (трассы) с восходящей (A+) и нисходящей (A–) амплитудой, несмотря на некоторые отклонения, в целом совпадают.

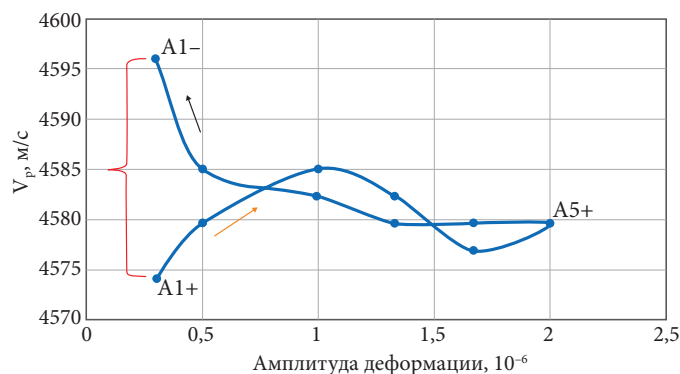


Рис. 4. Скорость продольной волны в песчанике в зависимости от амплитуды деформации

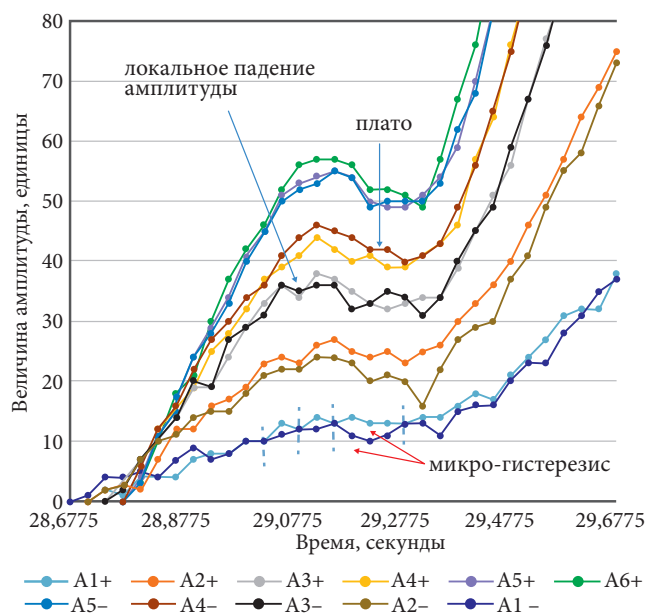


Рис. 5. Фрагменты фронта импульса в песчанике на шести величинах амплитуды



Обсуждение результатов

Эффект микропластичности сложным образом зависит от уровня деформации (величины прикладываемого механического воздействия). Эксперименты, проведенные в различных условиях, показывают принципиально одинаковые результаты. Это подтверждает факт влияния амплитуды деформации на скорость продольной волны. Изменение скорости продольной волны за счет амплитуды достигает 2 %. Новейшие исследования, проведенные на образцах горных пород с использованием высокоточной лазерной доплеровской интерферометрии, показывают, что изменение скорости волны за счет амплитуды достигает 5 % [12, 14, 27].

Действие амплитудного эффекта обнаружено на высоких сейсмических и килогерцовых частотах при динамических деформациях примерно 10^{-8} – 10^{-6} , которые относятся к области высоких скоростей деформации. Однако ранее полученные результаты квазистатических экспериментов [16, 20, 26, 28] указывают на возможность проявления такого эффекта на более низких частотах. Низкие скорости деформирования твердого тела создают еще более благоприятные условия для срабатывания механизма микропластичности [17, 22]. Замечено, что на низких амплитудах деформации величина амплитудного гистерезиса больше, чем на более высоких амплитудах.

Эксперименты показали «перехлест» петель гистерезиса, а значит и наблюдаемое увеличение или уменьшение скорости волны (модуля упругости). Небольшое изменение величины амплитуды сигнала (один дискретный шаг ΔA) может приводить к заметному изменению скорости волны. Стандартная (общепринятая) вязкоупругая модель для горных пород такого поведения модуля упругости не допускает. Эффект микрогистерезиса требует тщательного изучения, так как его влияние на динамические параметры волн может оказаться существенным.

Заключение

Эффект амплитудного гистерезиса может быть полезен для практического применения. Отсутствие гистерезиса в полностью водонасыщенной породе побуждает к проведению повторных экспериментов с учетом этого результата. Полученный эффект локального изменения скорости волны в небольшом диапазоне амплитуд деформации имеет как фундаментальное, так и практическое значение. В настоящее время в сейсмических методах чувствительность скорости волны к величине излучаемого сигнала не учитывается, что понижает точность исследования.

В заключение можно сказать, что заинтересованные в этом вопросе организации при желании могут проверить возможность применения амплитудно-зависимого эффекта на практике и определить его полезность для дальнейшего использования. Такая проверка не требует наличия специального оборудования. Используется то же самое оборудование, которое применяется при полевых работах, с некоторыми дополнениями. По крайней мере, высокоточные цифровые регистраторы являются доступными для эксперимента. Изменение величины амплитуды волны методически достигается, например, последовательным изменением мощности источника излучения волны. Учет амплитудного фактора может быть полезен, например, для уменьшения ошибок при построении сейсмического разреза и в других областях геофизических исследований. Возможные области проверки эффекта и его применения: сейсморазведка, ВСП, акустический каротаж и другие.

Список литературы

1. Вознесенский Е. А. *Поведение грунтов при динамических нагрузках*. М.: Изд-во Моск. ун-та; 1998. 320 с.
2. Гушин В. В., Шалашов Г. М. О возможности использования нелинейных сейсмических эффектов в задачах вибрационного просвечивания Земли. В: Николаев А. В., Галкин И. Н. *Исследование Земли невязрывными сейсмическими источниками*. М.: Наука; 1981. С. 144–155.
3. Гушин В. В., Павленко О. В. Изучение нелинейно-упругих свойств земных пород по сейсмическим данным. *Современная сейсмология. Достигновения и проблемы*. 1998;13.
4. Егоров Г. В. Вариация нелинейных параметров консолидированного пористого водо-насыщенного образца в зависимости от степени газо-насыщения. *Физическая мезомеханика*. 2007;10(1):107–110.
5. Николаев А. В. *Проблемы нелинейной сейсмики*. М.: Наука; 1987. 288 с.
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. Кондратьев О. К. *Сейсмические волны в поглощающих средах*. М.: Недра; 1986. 176 с.
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 Micro-plasticity. *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. P. 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. Егоров Г. В., Носов В. М., Маньковский В. В. Экспериментальная оценка нелинейных упругих параметров сухой и флюидо-насыщенной пористой среды. *Геология и геофизика*. 1999;40(3):457–464.

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 mekhanika*. 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.)

Информация об авторе

Эдуард Иннокентьевич Машинский – д.г.-м.н., Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук, SCOPUS ID: [8886240600](https://orcid.org/0000-0002-8886-2406); г. Новосибирск, Россия; e-mail: MashinskiiEI@ipgg.sbras.ru

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

Поступила в редакцию 07.01.2021

Received 07.01.2021

Поступила после рецензирования 07.02.2021

Revised 07.02.2021

Принята к публикации 08.02.2021

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].

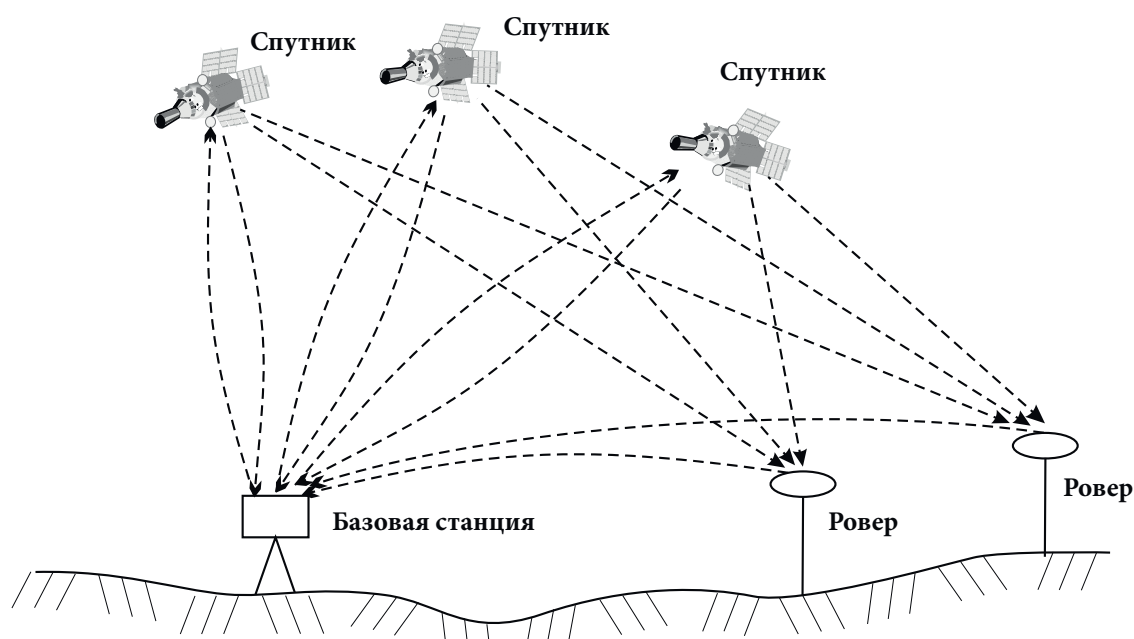


Рис. 1. Схема общей структуры маркшейдерских измерительных систем на основе спутниковых технологий

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 проращением 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).

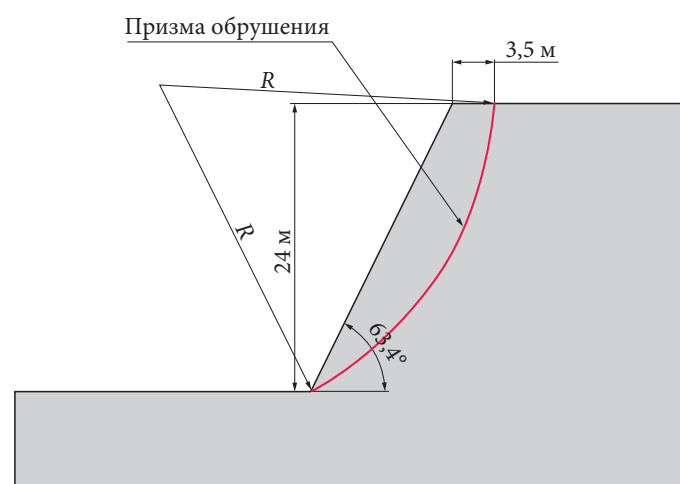

Рис. 2. Определение влияния веса груженого автосамосвала, приходящегося на 1 п. м встроенного и рабочего уступа и отвала высотой уступа 24 м

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

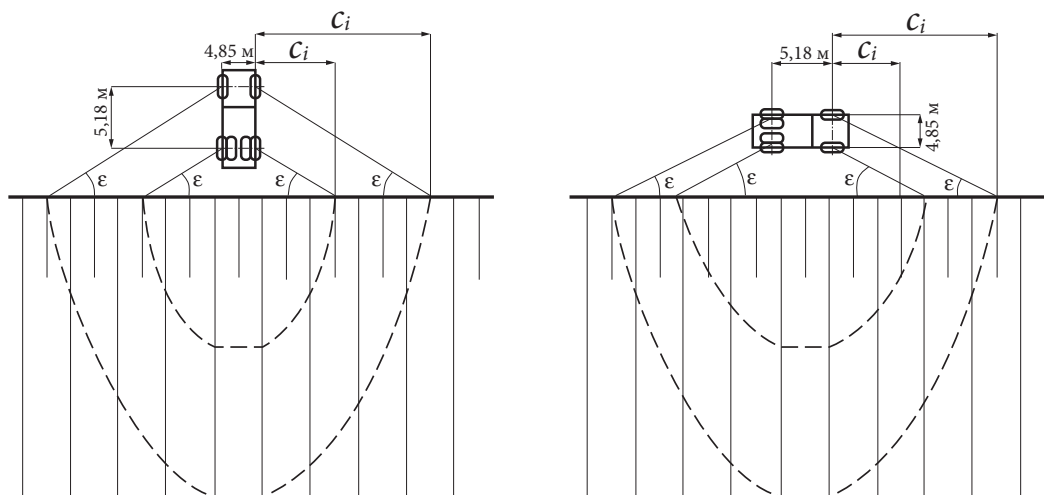

Рис. 3. Схема расчета влияния веса самосвала с грузом на уступ

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.

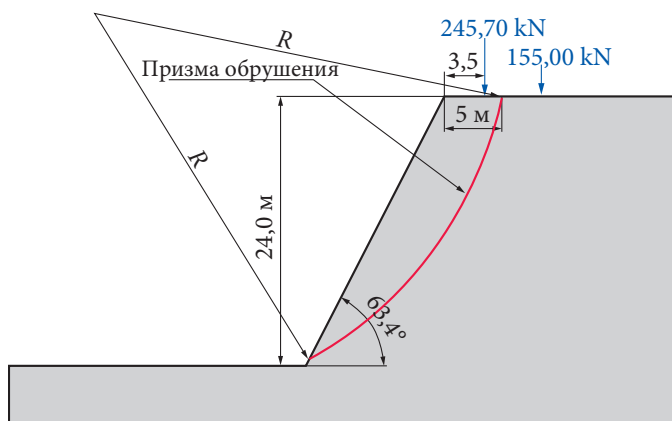


Рис. 4. Определение устойчивости откосов уступов и ширины призмы обрушения под воздействием веса гружёного автосамосвала, расположенного на расстоянии 3,5 м от бровки откоса

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

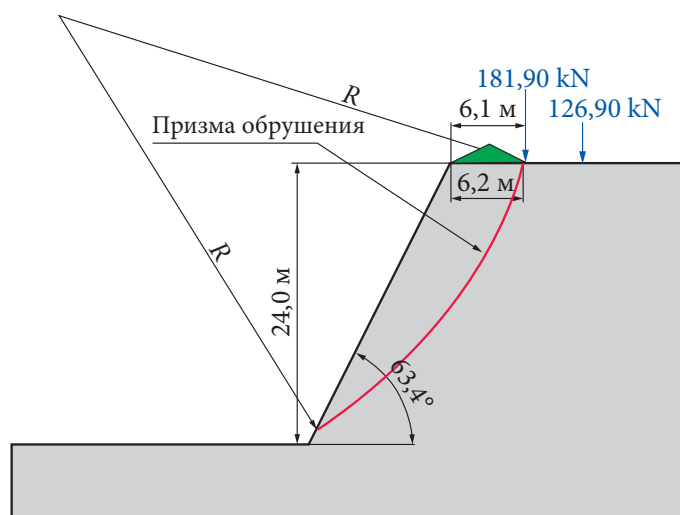


Рис. 5. Определение устойчивости откосов уступов и ширины призмы обрушения в зависимости от веса гружёного автосамосвала, расположенного на расстоянии 6,4 м от бровки откоса, находящегося за пределами вала безопасности

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.

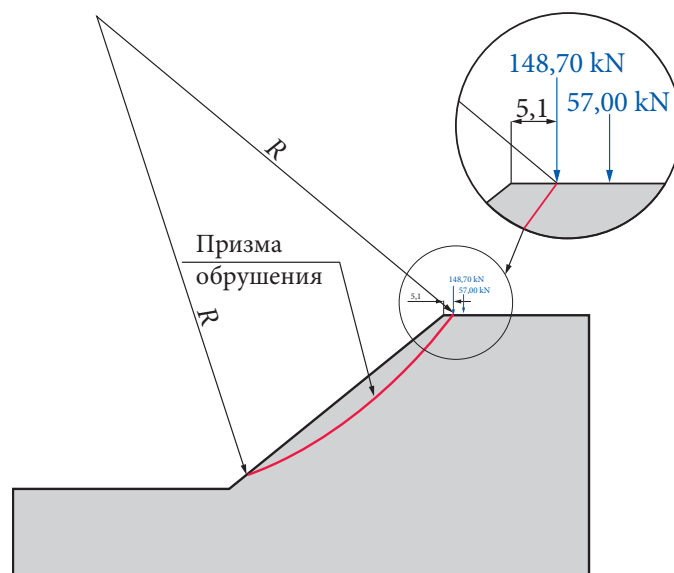


Рис. 6. Определение устойчивости откосов отвалов и ширины призмы обрушения в зависимости от веса гружёного автосамосвала, расположенного на расстоянии 5,1 м от бровки откоса отвала

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 призм обрушения, выполненные аналитическим методом, дает более высокие результаты точности, чем полученные графическим методом;

– устойчивость откосов уступов и ширина призм 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.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. 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. 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. 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'Academie 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. Протодяконов 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 цитированияМолдаши 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 деятельностью 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 противофильтрационных 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. Заготовка и готовый винтовой центратор производства АО «Волковгеология»

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

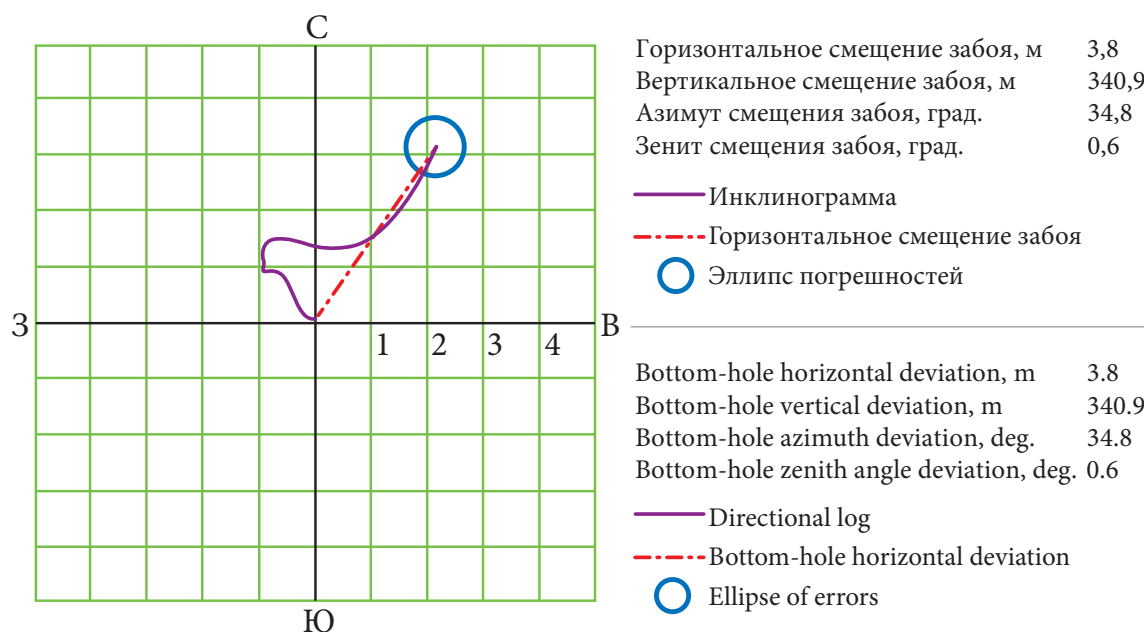


Рис. 2. Инклинограмма скважины, пробуренной с центратором Ø156 мм

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 разнородных 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 Environmental 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., Киршин 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 Nef't'*. 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.

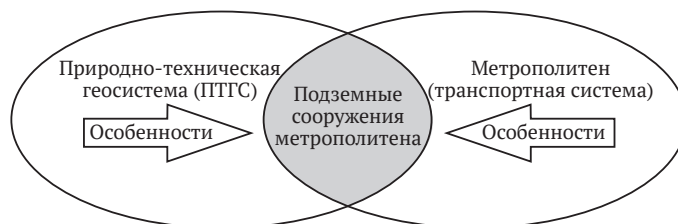


Рис. 1. Положение сооружения метрополитена в природно-технической геосистеме и транспортной системе

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:

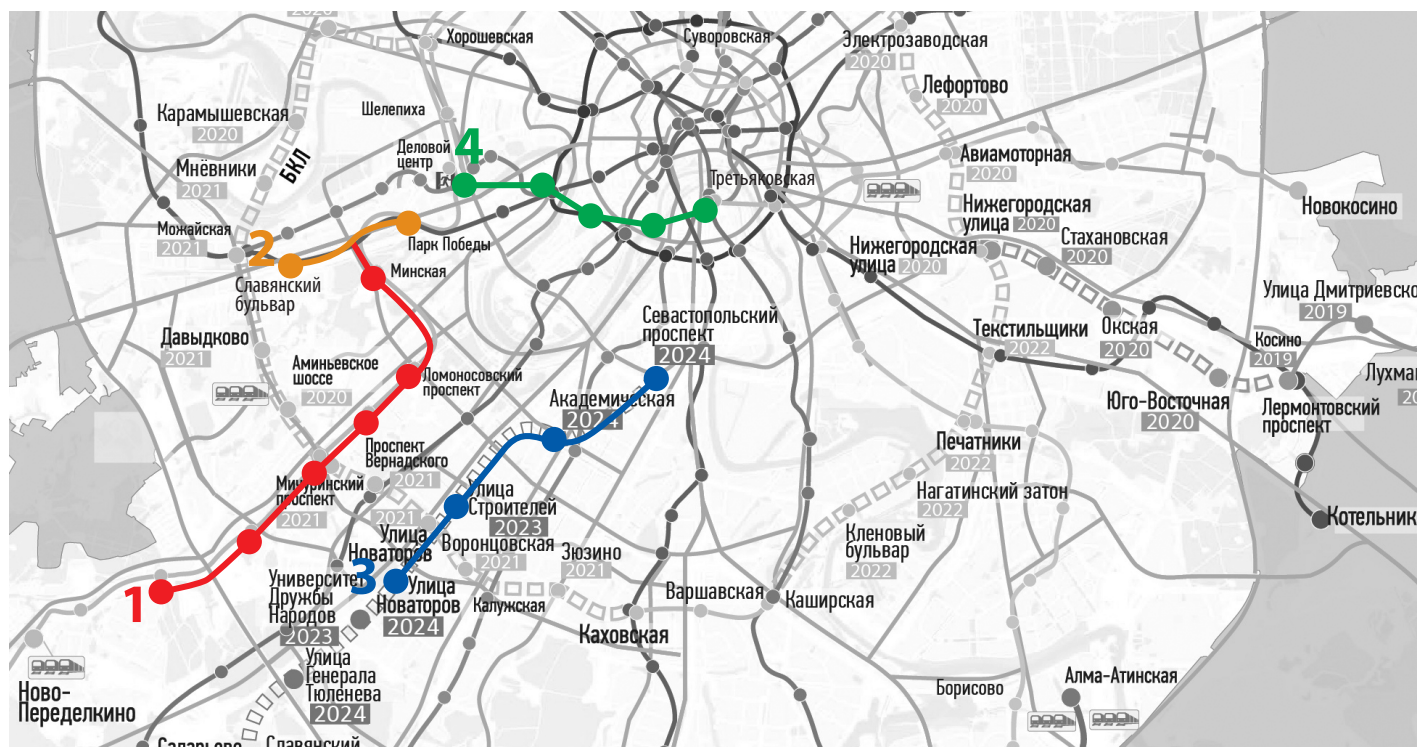
$$X_4 = V_{\text{соор}}, \quad (4)$$

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

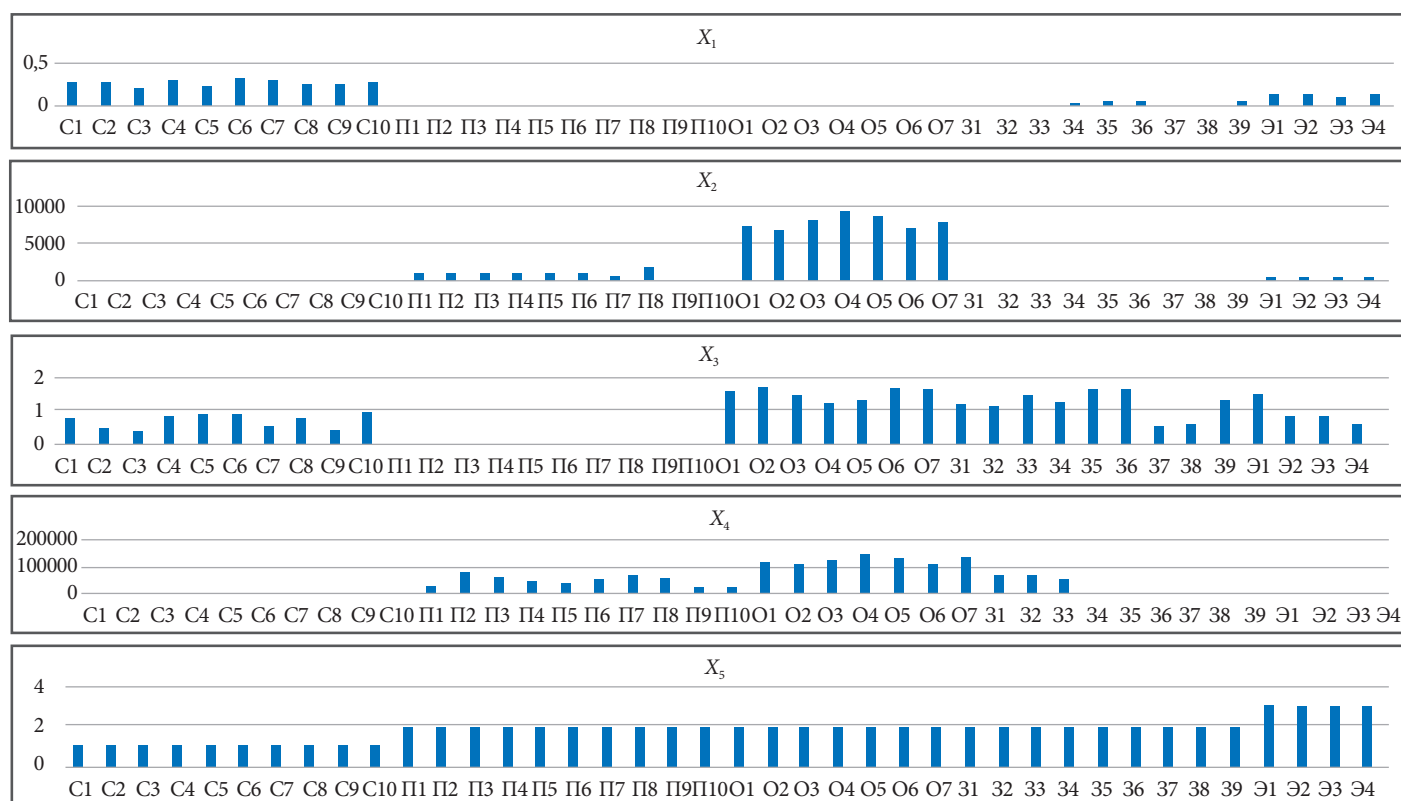


Таблица 2 / Table 2

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.

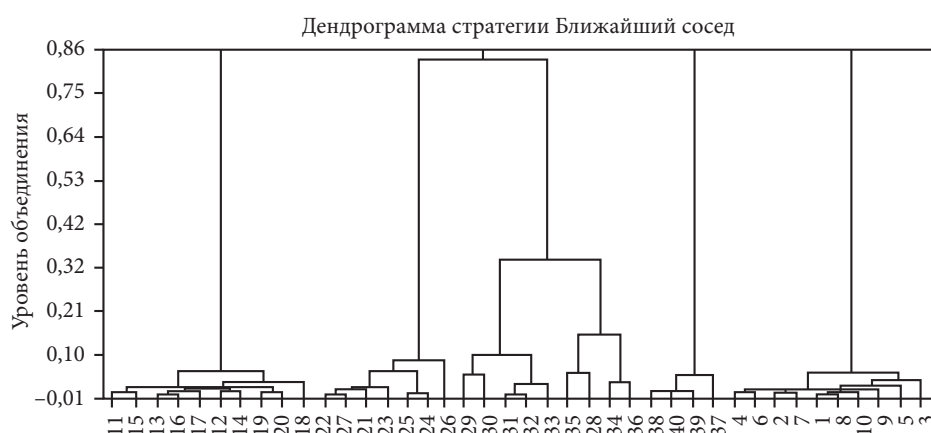


Рис. 4. Дендрограмма с выделенными кластерами

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							
						4	По месту проявления				
									3.1	По виду деформации	
									3.2	По виду разрушения	
									4.1	По точке локализации	

Рис. 5. Общая форма классификации (на примере классификации проявления рисков ситуаций)

Fig. 5. The classification general form (as exemplified by the classification of hazard materialization)



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