

eISSN 2500-0632



MINING SCIENCE AND TECHNOLOGY (RUSSIA)

TOM 7, № 4
2022

GORNYE NAUKI I TEKHNologii
ГОРНЫЕ НАУКИ И ТЕХНОЛОГИИ

MISIS



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



Activities of the *Mining Science and Technology (Russia) (Gornye nauki i tekhnologii)* international journal are aimed at developing international scientific and professional cooperation in the field of mining.

The journal target audience comprises researchers, specialists in the field of mining, representatives of academic and professional communities.

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

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

EDITOR-IN-CHIEF

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

DEPUTIES EDITOR-IN-CHIEF

Oleg I. Kazanin, Prof., Dr.Sci.(Eng.), 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, Prof., Ph.D., University of Kentucky, Lexington, Kentucky, USA

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

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

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

Faramarz Doulati Ardejani, Prof., Ph.D., Colledge of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

Mikhail Ershov, Prof., Dr.Sci.(Eng.), National University of Oil and Gas "Gubkin University", Moscow, Russian Federation

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

Ochir Gerel, Prof., Dr.Sci.(Geol. and Min.), Geoscience Center, the Mongolian University of Science and Technology, Ulaanbaatar, Mongolia

Zoran Gligorić, Prof., Dr.Sci. (Mining-Underground Mining), University of Belgrade, Belgrade, Republic of Serbia

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

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

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

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

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

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

Jyant Kumar, Prof., Ph.D-Geotech.Eng., Indian Institute of Science, Bengaluru, India

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

Sergey Malafeev, Prof., Dr.Sci.(Eng.), Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, Vladimir, Russia

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

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

Igor Petrov, Dr.Sci.(Eng.), Infomine Research Group LLC, Moscow, Russian Federation

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

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

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

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

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

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

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

Natalia Zhuravleva, Prof., Dr.Sci.(Eng.), West Siberian Testing Center JSC (WSTCenter JSC), Novokuznetsk, Russian Federation

EDITORIAL COUNCIL

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

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

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

Yuri I. Razorenov, Prof., Dr.Sci.(Eng.), 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

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

FOUNDER AND PUBLISHER



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

CONTACT

4 Leninsky Prospect, Moscow 119049, Russian Federation

Phone: +7 (495) 955-00-77

e-mail: send@misis.ru



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



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

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

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

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

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

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

ЗАМЕСТИТЕЛИ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

Казанин Олег Иванович, проф., д.т.н., 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, проф., д-р наук, Университет Кентукки, г. Лексингтон, Кентукки, США

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

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

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

Герел Очир, проф., д.г.-м.н., Центр геолого-геофизических исследований, Монгольский университет науки и технологии, г. Улан-Батор, Монголия

Глигорич Зоран, проф., д-р наук, Белградский университет, г. Белград, Республика Сербия

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

Дулати Ардежани Фарамарз, проф., д-р наук, Инженерный колледж, Тегеранский университет, г. Тегеран, Иран

Ершов Михаил Сергеевич, проф., д.т.н., Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) им. И.М. Губкина, г. Москва, Российская Федерация

Журавлева Наталья Викторовна, проф., д.т.н., АО «Западно-Сибирский испытательный центр» (АО «ЗСИЦентр»), г. Новокузнецк, Российская Федерация

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

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

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

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

Кумар Джьянт, проф., д-р наук (геотехнический инжиниринг), Индийский институт науки (Indian Institute of Science), г. Бангалор, Индия

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

Малафеев Сергей Иванович, проф., д.т.н., Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых, г. Владимир, Российская Федерация

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

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

Петров Игорь Михайлович, д.т.н., ООО «Исследовательская группа «Инфолайн»», г. Москва, Российская Федерация

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

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

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

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

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

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

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

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

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

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

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

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

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

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

ОТВЕТСТВЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ

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

ПЕРИОДИЧНОСТЬ 4 раза в год

ОСНОВАН в 2016 году

РЕГИСТРАЦИЯ

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

Свидетельство о регистрации Эл № ФС77-62652.

ИНДЕКСИРОВАНИЕ

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

Журнал открытого доступа.

УЧРЕДИТЕЛЬ И ИЗДАТЕЛЬ



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

АДРЕС УЧРЕДИТЕЛЯ И ИЗДАТЕЛЯ

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

КОНТАКТЫ РЕДАКЦИИ

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

Телефон: +7 (495) 955-00-77

e-mail: send@misis.ru



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.



CONTENTS

MINERAL RESOURCES EXPLOITATION

- Measurement of feeder performance during coal discharge from an underroof seam using machine vision 264
M. S. Nikitenko, S. A. Kizilov, Yu. N. Zakharov, D. Yu. Khudonogov, A. Yu. Ignatova

GEOLOGY OF MINERAL DEPOSITS

- New methods of predicting and prospecting/exploration of hydrocarbon deposits to improve exploration performance in the Timan-Pechora oil and gas province 274
N. P. Demchenko, V. B. Rostovshchikov, I. V. Kolokolova, I. A. Marakova, D. S. Volkov

BENEFICIATION AND PROCESSING OF NATURAL AND TECHNOGENIC RAW MATERIALS

- Selection of Temperature regimes for conditioning and flotation of diamond-bearing kimberlite with compound collectors 287
V. V. Morozov, E. G. Kovalenko, G. P. Dvoichenkova, V. A. Chut-Dy

- Effect of sonochemical pretreatment of slurry depressors on sylvan flotation performance 298
V. E. Burov, V. Z. Poilov, Z. Huang, A. V. Chernyshev, K. G. Kuzminykh

SAFETY IN MINING AND PROCESSING INDUSTRY AND ENVIRONMENTAL PROTECTION

- Higher rank aerological risks in coal mines 310
S. V. Balovtsev

MINING MACHINERY, TRANSPORT, AND MECHANICAL ENGINEERING

- A systematic approach to the peat machines and equipment classification development 320
B. F. Zyuzin, T. B. Yakonovskaya, A. I. Zhigulskaya

EXPERIENCE OF MINING PROJECT IMPLEMENTATION

- Value chain stress resilience and behavioral strategies of companies in Russian coal industry 330
E. V. Goosen, S. M. Nikitenko, V. I. Klishin, E. S. Kagan, Y. F. Patrakov



СОДЕРЖАНИЕ

РАЗРАБОТКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

- Измерение производительности питателя при выпуске угля из подкровельной толщи на основе технологии машинного зрения 264
М. С. Никитенко, С. А. Кизилов, Ю. Н. Захаров, Д. Ю. Худоногов, А. Ю. Игнатова

ГЕОЛОГИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

- Новые технологии прогноза и поисков залежей углеводородов с целью повышения эффективности геологоразведочных работ в Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции 274
Н. П. Демченко, В. Б. Ростовщиков, И. В. Колоколова, И. А. Маракова, Д. С. Волков

ОБОГАЩЕНИЕ, ПЕРЕРАБОТКА МИНЕРАЛЬНОГО И ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ

- Выбор температурных режимов кондиционирования и флотации алмазосодержащих кимберлитов компаундными собирателями 287
В. В. Морозов, Е. Г. Коваленко, Г. П. Двойченкова, В. А. Чуть-Ды

- Влияние предварительной сонохимической обработки депрессоров шламов на эффективность сильвиновой флотации 298
В. Е. Буров, В. З. Пойлов, Ч. Хуан, А. В. Чернышев, К. Г. Кузьминых

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ В МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОМ КОМПЛЕКСЕ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

- Аэрологические риски высших рангов в угольных шахтах 310
С. В. Баловцев

ГОРНЫЕ МАШИНЫ, ТРАНСПОРТ И МАШИНОСТРОЕНИЕ

- Системный подход к развитию классификации торфяных машин и оборудования 320
Б. Ф. Зюзин, Т. Б. Яконовская, А. И. Жигульская

ОПЫТ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТОВ В ГОРНОПРОМЫШЛЕННОМ СЕКТОРЕ ЭКОНОМИКИ

- Стрессоустойчивость цепочек добавленной стоимости и стратегии поведения компаний в российской угольной отрасли 330
Е. В. Гоосен, С. М. Никитенко, В. И. Клишин, Е. С. Каган, Ю. Ф. Патраков



РАЗРАБОТКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-09-22>

УДК 004.932:681.5

**Измерение производительности питателя при выпуске угля из подкровельной толщи на основе технологии машинного зрения**

М. С. Никитенко¹   , С. А. Кизилев¹  , Ю. Н. Захаров²  ,
Д. Ю. Худогов¹, А. Ю. Игнатова³  

¹ Федеральное исследовательское учреждение «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии

Сибирского отделения Российской академии наук (ФИЦ УУХ СО РАН), г. Кемерово, Российская Федерация

² Кемеровский государственный университет (КемГУ), г. Кемерово, Российская Федерация

³ Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово, Российская Федерация

 ltd.mseng@gmail.com

Аннотация

Технология выпуска угля из подкровельной пачки использует так называемый гравитационный выпуск, когда уголь выпускается из-под кровли «самотеком» под действием силы тяжести. Выпуск при этом можно производить на главный конвейер (забойный – расположенный в закрепленном пространстве), центральный (в западной литературе – задний) и хвостовой (завальный – расположенный в незакрепленном пространстве). Наиболее распространенными на данный момент времени являются комплексы с выпуском на завальный конвейер. Целью исследования является измерение производительности механизированного пластинчатого питателя, подающего уголь от выпускного окна крепи на конвейер в технологии отработки мощных пластов с выпуском на забойный конвейер. Для достижения цели предлагается осуществлять измерение объема с применением технологии машинного зрения. Исследованы способы расчета единичного объема на измерительном участке на трехмерной модели. Проведены лабораторные исследования, в рамках которых оценены относительные погрешности.

Исследования позволили формализовать: способ сбора данных для расчета единичного объема угля; методику расчета единичного объема на измерительном участке; способ расчета производительности питателя на основе системы машинного зрения, а также подходы для физического упрощения сцены, исследуемой машинным зрением. Относительная погрешность менее 10 % при имеющейся точности измерений для построения карты высот говорит о достаточности для инженерного использования предложенного способа расчета. Разработанный математический аппарат для расчетов единичного объема угля на измерительном участке и измерения производительности питателя позволяют создавать алгоритмическое обеспечение с использованием элементарных математических функций: сложение, вычитание, умножение и деление. Данный аспект важен, так как снижает планку требований к среде разработки программного обеспечения, а соответственно, расширяет номенклатуру аппаратных средств, пригодных для выполнения задач расчета производительности питателя.

Ключевые слова

горное дело, добыча угля, лавный комплекс, производительность, выпуск угля, забойный конвейер, объем горной массы, машинное зрение, распознавание образов, распознавание видеоизображений, карта высот

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук» проект FWEZ-2021-0017 «Разработка научных основ создания автономных и автоматизированных горных машин, оборудования, технических и управляющих систем на базе перспективных цифровых и роботизированных технологий» (рег. №121121000036-1) и грантов Минобрнауки России (Соглашения №075-15-2022-1199 и №075-15-2022-1190).

Для цитирования

Nikitenko M.S., Kizilov S.A., Zakharov Yu.N., Khudonogov D.Yu., Ignatova A.Yu. Measurement of feeder performance during coal discharge from an underroof seam using machine vision. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2022;7(4):264–273. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-09-22>



MINERAL RESOURCES EXPLOITATION

Research paper

Measurement of feeder performance during coal discharge from an underroof seam using machine visionM. S. Nikitenko¹   , S. A. Kizilov¹  , Yu. N. Zakharov²  , D. Yu. Khudonogov¹, A. Yu. Ignatova³  ¹ Federal Research Centre of Coal and Coal Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (FRC CCC SB RAS), Kemerovo, Russian Federation² Kemerovo State University (KemSU), Kemerovo, Russian Federation³ Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev, Kemerovo, Russian Federation lt.d.mseng@gmail.com**Abstract**

The technology for extracting and discharging coal from an underroof seam uses the so-called gravitational extraction method in which coal is extracted and discharged from under the roof by gravity. Here, coal can be discharged onto the main conveyor (face conveyor, located in the supported area), central conveyor (rear conveyor in Western literature), and tail conveyor (discharge conveyor, located in the unsupported area). The most common facilities used currently are longwall sets of equipment providing discharge onto tail conveyors. The purpose of this study is to measure the performance of a motorised plate feeder supplying coal from the outlet port of a roof support to a conveyor during the extraction of thick seams with discharge onto the face conveyor. To achieve the goal, it is proposed to measure the coal volume using machine vision. Methods for calculating a unit volume in a measuring section using a three-dimensional model were investigated. Laboratory studies were carried out to estimate the relative errors of the methods. The research allowed properly defining: a method for collecting data to calculate the unit volume of coal; a method for calculating the unit volume in the measuring section; a method for calculating the feeder performance using machine vision, and approaches for physically simplifying the video scene examined by machine vision. A relative error of less than 10 % with the existing measurement accuracy for constructing a coal layer surface height map indicates the sufficiency of the proposed calculation method for engineering use. The developed mathematical apparatus for calculating the unit volume of coal at the measuring section and measuring the feeder performance allows creating algorithmic software using the elementary mathematical functions of addition, subtraction, multiplication, and division. This aspect is important because it lowers sights for the software development environment, and therefore expands the range of hardware suitable for calculating the feeder performance.

Keywords

mining, coal mining, coalface, performance, coal discharge, face conveyor, rock mass volume, machine vision, pattern recognition, video image recognition, height map

Acknowledgements

This work was carried out within the framework of the government assignment for the Federal State Scientific Research Centre of Coal and Coal Chemistry, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences on the Project FWEZ-2021-0017 – “Development of Scientific Foundations for the Creation of Autonomous and Automated Mining Machinery, Equipment, and Technical and Control Systems Based on Advanced Digital and Robotic Technologies” (Reg. No. 121121000036-1) and grants of the Ministry of Education and Science of Russia (Agreement No. 075-15-2022-1199 and Agreement No. 075-15-2022-1190).

For citation

Nikitenko M. S., Kizilov S. A., Zakharov Yu. N., Khudonogov D. Yu., Ignatova A. Yu. Measurement of feeder performance during coal discharge from an underroof seam using machine vision. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2022;7(4):264–273. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-09-22>

Введение

Технология выпуска угля из подкровельной пачки использует так называемый гравитационный выпуск, когда уголь выпускается из-под кровли «самотеком» под действием силы тяжести [1, 2]. Выпуск при этом можно производить на главный конвейер (забойный – расположенный в закрепленном пространстве), центральный (в западной литературе – задний) и хвостовой (завальный – расположенный в незакрепленном пространстве) [3]. Наиболее распространенными на данный момент времени являются комплексы с выпуском на завальный конвейер [4–7].

В Российской Федерации предложен подход осуществлять управляемый выпуск угля, перемещая поток горной массы с помощью механизированного питателя из выпускного окна на главный конвейер [8, 9]. К его основным преимуществам относятся небольшие габаритные размеры секции крепи, сравнимые с габаритами крепи для классического лавного очистного комплекса, а также возможность производить одно-временный групповой выпуск из нескольких секций, реализуя перспективные технологии добычи угля с использованием волнового и площадного выпуска [8, 9]. Реализация столь сложных технологических



процессов, как волновой и площадной выпуск, требует разработки системы, контролирующей в реальном времени объём угля, подаваемый питателем из выпускного окна крепи на главный конвейер [9–12]. При групповом выпуске превышение объёма подачи угля выше расчётного значения из одного питателя может привести к перегрузу конвейера у точек разгрузки следующих питателей и просыпанию угля.

В ФИЦ УУХ СО РАН (FRC CCC SB RAS) на основе дискретно-событийных моделей рассчитаны оптимальный объём выпускаемого угля для каждой секции крепи, последовательность и рациональное количество работающих питателей, позволяющие обеспечить равномерность выпуска и максимальную загрузку конвейера [13–15]. Однако шахтного оборудования, способного эффективно выполнять задачу по измерению объёма выпускаемого пластинчатым питателем угля, в заданных условиях на рынке не представлено.

В мировой практике известны решения, применяющие источники когерентного света (лазерные излучатели) подсветки сыпучих веществ для определения их объёма. Одним из распространённых применений таких устройств являются измерители производительности конвейеров машинным зрением [16–19], которые с помощью триангуляции создают массив значений, характеризующий высоту слоя перемещаемого конвейером вещества в месте его пересечения лазерным лучом. Однако данный способ позволяет измерять только объём сыпучего вещества, перемещаемого через сканер с постоянной скоростью. Существует оборудование, которое использует лазерные 3D-сканеры (трехмерные LIDAR) для определения объёмов сыпучих веществ, перемещаемых с разными скоростями или находящихся в статичном состоянии [20, 21]. Однако вопрос применения технологии в условиях угольных шахт слабо проработан за редким исключением, как, например, австралийский проект ExScan, который пока не вышел на стадию коммерческих продаж и является штучным экспериментальным изделием [22].

Проведенный анализ показал, что в литературе представлено достаточно много работ, связанных с лазерной оценкой объёма, работающих с применением машинного зрения. Однако конкретных подходов к измерению объёма горной массы, перемещаемой питателем в условиях выпуска угля подкровельной толщи не выявлено. Проблема перегруза в современных комплексах с гравитационным выпуском решается малым количеством одновременно работающих на выпуск секций – от 1 до 5 шт. При этом используется дополнительный конвейер, что сводит возможность перегруза до минимума. Также расположение конвейера в незакрепленном пространстве делает последствия перегруза менее опасными, чем при выпуске на главный конвейер, но может приводить к увеличению потерь угля. На данный момент времени автоматизированными средствами при выпуске угля факт наличия угля не фиксируется. При подходе, описанном в [3], заслонка выпускного окна открывается на заданный промежуток времени, а за-

тем закрывается без обратной связи и учета успешности проведения выпуска. Наличие выпускаемого угля фиксируется визуально в районе перегружателя. Главной проблемой измерения производительности пластинчатого питателя является отсутствие потока угля с постоянной скоростью, так как пластинчатый питатель выполняет возвратно-поступательные движения с частотой близкой к 1 Гц. Такой тип питателя перемещает уголь дискретно небольшими партиями с частотой дискретизации, равной частоте работы питателя. Конструктивные особенности и способ работы питателей подобного типа не позволяют применить стандартные способы измерения производительности на основе взвешивания или сканирования формы потока на конвейерах.

Для опытно-конструкторской разработки задачу измерения объёма угля, подаваемого каждым питателем на конвейер, авторы разделили на несколько подзадач:

1. Разработать способ расчета производительности исходя из данных о единичном объеме и скорости его замещения.
2. Выбрать математический аппарат расчета единичного объёма угля, находящегося на измерительном участке.
3. Разработать методику для первичной верификации и валидации расчета единичного объёма угля, находящегося на измерительном участке.
4. Провести первичные верификацию и валидацию расчета единичного объёма угля, находящегося на измерительном участке.
5. Провести анализ результатов первичных верификации и валидации, на основе которого выбрать алгоритм для получения расчетных данных системой машинного зрения.

Методы

Первоначально определено место проведения замеров вдоль зоны перегрузки угля питателем от выпускного окна до конвейера. Практически на всем пути транспортировки угля от выпускного окна до конвейера работа питателя при возвратно-поступательном движении может менять порядок распределения выпускаемой горной массы при её перемещении. Единственный участок транспортировки, на котором направление движения угольной массы приобретает определённое направление и постоянную скорость замещения, – выпускной лоток. Выпускной лоток представляет собой откидной элемент, смонтированный на питателе, по которому уголь поступает с питателя на конвейер через технологический проем между ним и секцией крепи. Одним из возможных методов расчета производительности питателя является расчет объёма угля на некотором заданном участке лотка питателя (измерительном участке) с последующим определением времени замещения данного участка новой порцией угля. Математический аппарат для расчета производительности питателя в этом случае сводится к расчету объёма тела, представляющего собой объём угольной массы на измерительном участке в единицу времени:



$$P_{\text{пит}} = V_{\text{ед}} \cdot T_{\text{сму}}, \quad (1)$$

где $P_{\text{пит}}$ – производительность питателя, $\text{м}^3/\text{с}$; $V_{\text{ед}}$ – единичный объем угля на измерительном участке, м^3 ; $T_{\text{сму}}$ – частота смены измерительного участка, с^{-1} , прямо пропорциональна частоте работы питателя и подступает в формулу расчета от средств автоматизации лавного комплекса.

Исходя из этого задаются входные данные, необходимые для расчета объема угля на измерительном участке. Соответственно, для измерения объема выпускаемого угля в единицу времени необходимо измерить его объем и скорость замещения на измерительном участке. Оптимальная производительность питателя в соответствии с дискретно-событийной моделью выпуска [13] рассчитывается в килограммах за секунду. Таким образом, через насыпную плотность угля рассчитывается производительность

$$P_{\text{пит.кг/с}} = \rho_{\text{уг}} \cdot V_{\text{ед}} \cdot T_{\text{сму}}, \quad (2)$$

где $\rho_{\text{уг}}$ – насыпная плотность угля на участке разрабатываемого пласта.

Скорость замещения является величиной, получаемой на основании данных при пусконаладочных работах, и зависит от фракции выпускаемого угля и частоты работы питателя. При измерении объема форма измерительного участка – прямоугольник. Измеряемая угольная масса, находящаяся на площади участка измерения, имеет переменную высоту по всей его площади. Для расчёта объема угля необходимы данные, характеризующие его высоту относительно уровня измерительного участка в заданных точках.

Наиболее очевидным выбором для получения набора данных, необходимых для работы математического аппарата, является система машинного зрения, совмещенная с нейросетевым интерфейсом распознавания образов [13, 14]. Однако для корректной работы нейросети, распознающей образы, как правило, требуется значительная обучающая выборка, которой не будет до введения в опытную работу лавного комплекса с соответствующей конструкцией. А низкое качество изображения, получаемого с современных видеокамер, сертифицированных для установки на лавных комплексах, ограничивает возможность применения классических алгоритмов распознавания видеосцены. Это однозначно говорит об актуальности и необходимости упрощения анализируемой видеосцены до её компьютерной обработки.

Для решения такой задачи предложено спроецировать на исследуемую поверхность прямоугольную сетку лазерных лучей контрастного цвета (далее – световые маркеры). Световые маркеры обеспечат проекцию на неровную поверхность и изменят свою форму с прямолинейной на форму того участка, на который он спроецировался, что позволит получить информацию о форме участка под световым маркером. Следующий шаг – определить координаты светового маркера относительно уровня измерительного участка в любой его точке в ручном режиме без использования методик нейросетевого распознавания видеоряда.

Наличие светового маркера значительно упрощает распознавание видеосцены машинным зрением, создавая на картинке сцены четкий контрастный по освещённости и цвету участок относительно других объектов, который требуется обработать, исключив лишнюю информацию из изображения на стадии предпроцессинга. Такой подход определит алгоритмы распознавания образов, снизив требования к компьютерной мощности устройства, на котором производится обработка видеосигнала.

Результаты

Для расчета объема угля на измерительном участке измерялась его высота только в точках пересечения световых маркеров, формируя таким образом карту высот измерительного участка.

Представим измерительный участок в виде совокупности параллелограммов с равными по размерам основаниями и высотой, соответствующей данным из карты высот. Сумма объемов полученных параллелограммов будет являться объемом фигуры на исследуемом участке.

Первичная верификация предложенного способа выполнена на референсной фигуре с криволинейной поверхностью – полусфере, объём которой можно предварительно рассчитать по формуле, задав габаритные размеры, сопоставимые с размером измерительного участка на реальном питателе. Ожидаемый объём полусферы $V_{\text{ож}}$ рассчитан по формуле (1) и составил $261,8 \cdot 10^6 \text{ мм}^3$:

$$V_{\text{ож}} = \frac{4}{3} \frac{\pi r^3}{2}. \quad (3)$$

Входные данные: радиус r , мм, 500; шаг сетки световых маркеров по оси x , мм, $X = 50 - \text{const}$; шаг сетки световых маркеров по оси y , мм, $Y = 50 - \text{const}$; координата точки по оси $x - x_i$; координата точки по оси $y - y_n$; высота слоя, мм, на точке с координатами – $h_{x,y}$.

Таким образом, эталонная фигура, объём которой рассчитывается согласно предложенному методу, имеет в своём основании круг радиусом 500 мм. Зона измерения представлена квадратом, имитирующим измерительный участок на поверхности питателя, размером 1000×1000 мм. Референсная фигура вписана в зону измерения. Световые маркеры представлены сечениями на зоне измерения по вертикали и горизонтали с шагом 50 мм в обоих направлениях.

Для сбора данных предложено произвести условное рассечение референсной фигуры по местам прохождения световых маркеров, получив таким образом набор малых фигур. Тогда малая фигура представляет собой объёмное тело с двумя равными параллельными боковыми поверхностями, которые являются криволинейными трапециями, полученными в результате рассечения полусферы в координате h_y . Объём малой фигуры V_1 можно рассчитать по формуле:

$$V_1 = S_{\text{бп}} \cdot Y, \quad (4)$$

где $S_{\text{бп}}$ – площадь боковой поверхности; Y – размер малой фигуры по оси y . Площадь криволинейной

трапеции – вычисляется с помощью определённого криволинейного интеграла. При расчёте производительности питателя не требуется высокая точность в результатах, расчетный объём пренебрежимо мал относительно общей секундной производительности, но важна скорость проводимых вычислений. Для проведения расчета высоты прямоугольников h_x с шагом X заносятся в таблицу. Полученная таблица представляет карту высот для расчета объема малой фигуры. Тогда $S_{\text{оп}}$ можно рассчитать по формуле:

$$S_{\text{оп}} = X \sum_{x=1}^{x_2} h_x; \quad (5)$$

соответственно:

$$V_1 = YX \sum_{x=1}^{x_2} h_x. \quad (6)$$

Следовательно, объем всей эталонной фигуры $V_{\text{расч}}$ представлен в виде суммы объемов всех прямоугольных параллелепипедов, входящих в состав всех малых фигур, на которые была разделена референсная фигура. Тогда $V_{\text{расч}}$ рассчитывается по формуле:

$$V_{\text{расч}} = XY \sum_{y=1}^{y_2} \sum_{x=1}^{x_2} h_{x,y}, \quad (7)$$

где

$$\sum_{y=1}^{y_2} \sum_{x=1}^{x_2} h_{x,y} -$$

сумма всех высот, измеренных в сечениях образца, с координатами $h_{x,y}$.

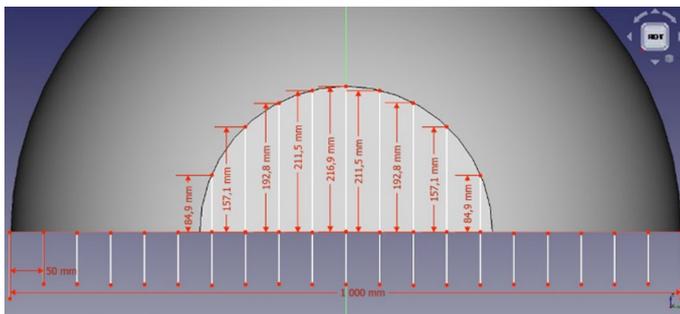
Референсная фигура была построена с использованием CAD системы моделирования FreeCAD. Полученная объёмная модель полусферы последовательно рассекалась по оси X с заданным в условии шагом, затем создавалась карта высот криволинейной поверхности в каждом полученном сечении, которое представляло собой малую фигуру. Высоты измерялись с шагом X . Процесс последовательного получения координат высот в качестве данных для формирования карты высот показан на рис. 1.

Далее данные высот занесены в таблицу, общий вид которой показан на рис. 2.

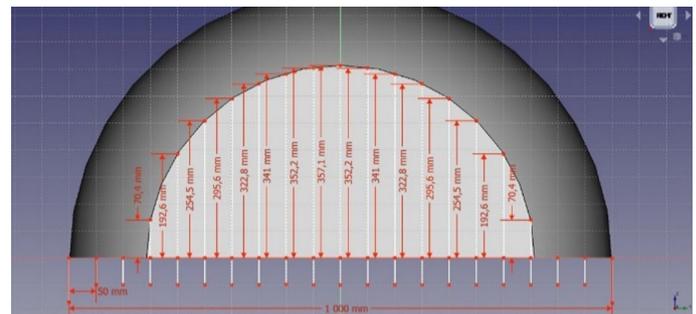
Полученная карта высот имитирует информацию от системы машинного зрения. Для контроля достоверности результатов измерений по данным таблицы построена диаграмма поверхности, показанная на рис. 3, а.

Диаграмма поверхности, построенная с использованием MS Excel, показывает, что замеры при построении карты высот выполнены без грубых ошибок и ими можно пользоваться для первичной верификации способа расчета объёма.

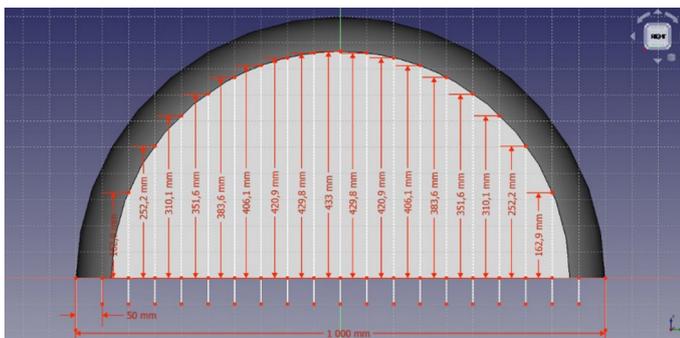
Как видно из рис. 1, сечениями Y образуются малые тела, имеющие плоские боковые стороны и основание, ограниченные сверху криволинейной поверхностью, что соответствует предложенному методу расчета. Таким образом, вся референсная фигура представляется в виде набора соответствующих прямоугольных параллелепипедов, имеющих основание размером X на Y . На рис. 3, б показано изображение упрощенного референсного тела, полученного в результате преобразования всех малых тел в прямоугольные параллелепипеды.



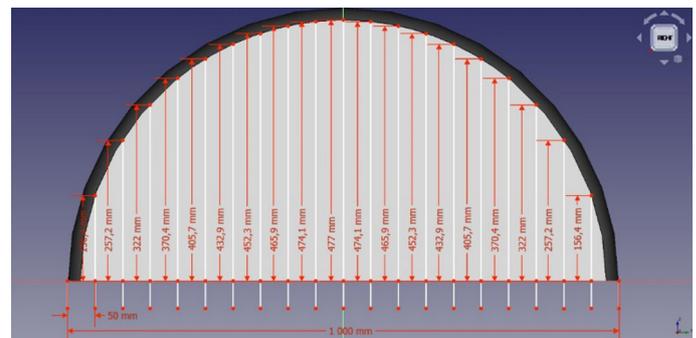
а



б



в



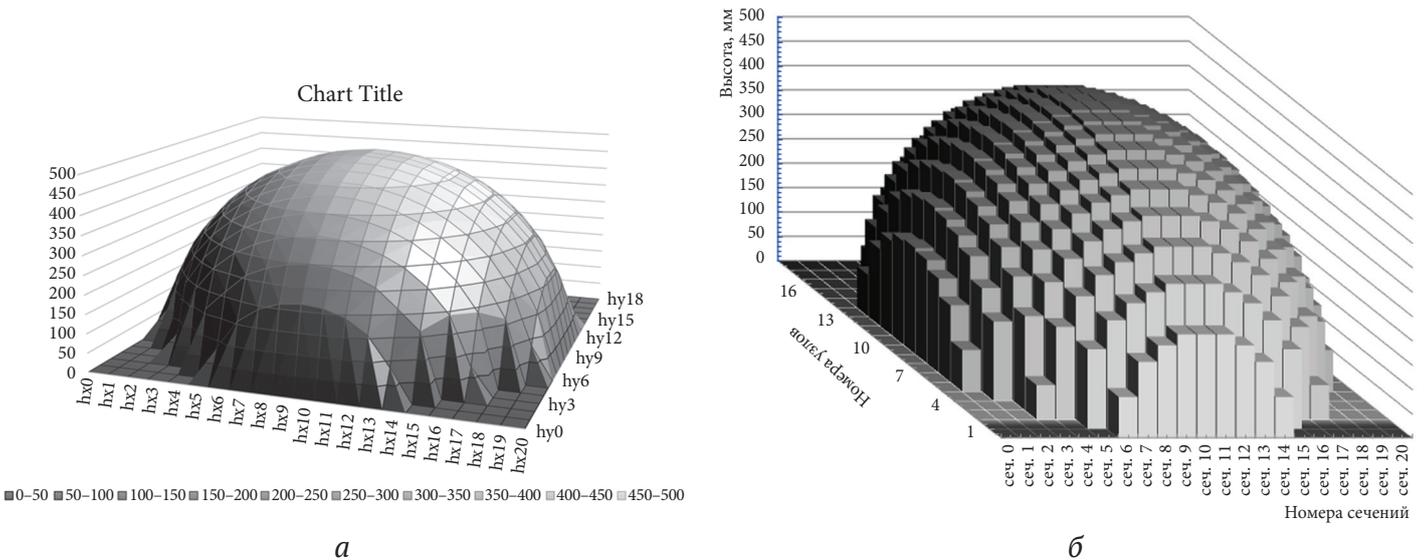
г

Рис. 1. Процесс получения координат высот вершин прямоугольников по сечениям для формирования карты высот: а – сечение 2; б – сечение 4; в – сечение 6; г – сечение 8

Координаты высот	h_x	h_{x+1}	...	h_{x+i}
h_y	$h_{x,y}$	$h_{x+1,y}$...	$h_{x+i,y}$
h_{y+1}	$h_{x,y+1}$	$h_{x+1,y+1}$...	$h_{x+i,y+1}$
...
h_{y+n}	$h_{x,y+n}$	$h_{x+1,y+n}$...	$h_{x+i,y+n}$

Рис. 2. Общий вид таблицы данных карты высот:

$h_{x,y}$ – высота от нулевой отметки с координатами x, y до кривой, ограничивающей поверхность сечения в месте разреза



а

б

Рис. 3. Представление референсной фигуры:

а – в виде диаграммы поверхности по данным измерений; б – полученное методом прямоугольников на основе измерения

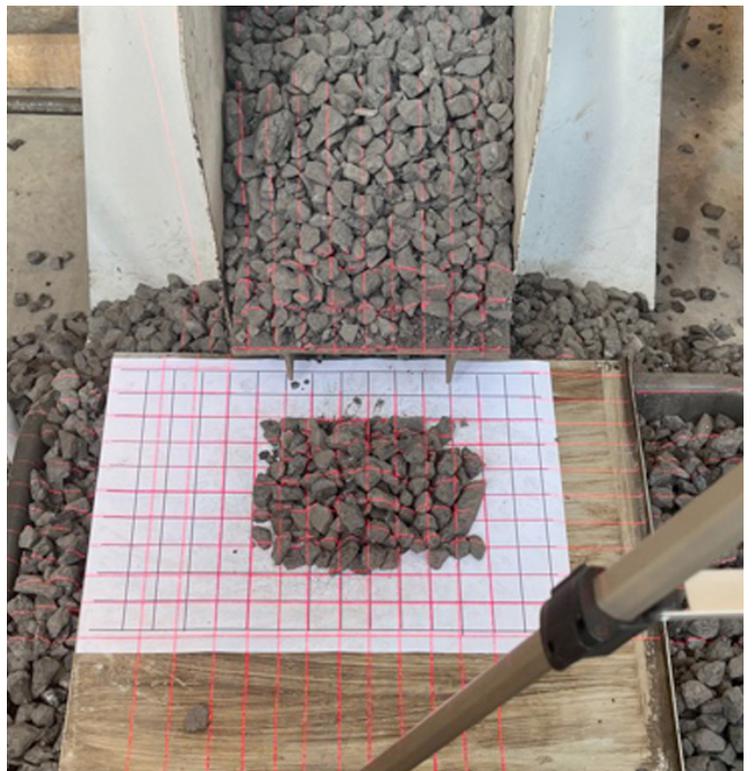


Рис. 4. Процесс валидации методики на модели измерительного участка



Рассчитанный по формуле (7) объем референсной фигуры составил $259,3 \cdot 10^6 \text{ мм}^3$. Относительная погрешность измерения – 0,95 % от ожидаемого результата.

Для валидации методики проведена серия лабораторных экспериментов с применением средств проецирования лазерной сетки на плоскую поверхность (измерительный участок), имитирующую выпускной лоток питателя секции крепи. В ходе экспериментов на измерительном участке размещался известный объем угля (рис. 4) с заранее измеренными насыпной плотностью и весом, что позволило рассчитать его объем математически.

Для построения карты высот используемый слой угля зондировался металлической спицей в месте пересечения лазерных лучей, затем уровень угля фиксировался на спице маркером. По данным измерений строилась карта высот, которая представлена в табл. 1, где y – координата точки измерения в поперечном сечении измерительного участка с точкой отсчета со стороны питателя, а x – координата точки измерения в продольном сечении измерительного участка с точкой отсчета в крайней левой части координатной сетки.

Таблица 1

Карта высот угля на измерительном участке, мм

$h_{x,y}$	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8
y_1	10	27	8	5	16	16	0	0
y_2	14	23	11	27	15	26	23	0
y_3	20	25	35	34	40	13	35	17
y_4	18	19	34	43	32	29	27	12
y_5	25	20	30	25	26	21	20	0
y_6	20	5	12	26	28	21	13	0
y_7	0	0	17	13	10	8	24	0

Исходя из насыпной плотности угля и веса отобранной пробы рассчитан ожидаемый объем $V_{\text{ож}} = 0,74 \cdot 10^6 \text{ мм}^3$.

Размер ячеек сетки световых маркеров $h_x = 25 \text{ мм}$, $h_y = 25 \text{ мм}$.

Используя формулу (5), получаем расчетный объем $V_{\text{расч}} = 0,63 \cdot 10^6 \text{ мм}^3$.

Относительная ошибка $V_{\text{расч}}$ от $V_{\text{ож}}$ составила 13,55 %.

Полученная относительная ошибка достаточно велика, что связано с двумя факторами: 1 – несовершенство примененных методов измерения; 2 – упрощение методики расчета объема, плохо учитывающее неоднородность поверхности объема угля и его распределение по измерительному участку.

Для компенсации в расчете неоднородности поверхности объема измеряемого угля предложен расчет методом прямоугольников с двойным пересчетом в противоположных направлениях и последующим усреднением результата:

$$V_{\text{расч1}} = \frac{\left(\sum_{y=1}^{y_2-1} \sum_{x=1}^{x_2} h_{x,y} + \sum_{x=1}^{x_2} h_{x,y_2-1} + \sum_{y=2}^{y_2} \sum_{x=1}^{x_2} h_{x,y} + \sum_{x=1}^{x_2} h_{x,2} \right) YX}{2}. \quad (8)$$

Применим формулу (8) к данным из табл. 1. Тогда $V_{\text{расч1}} = 0,67 \cdot 10^6 \text{ мм}^3$.

Относительная ошибка $V_{\text{расч1}}$ от $V_{\text{ож}}$ составила 8,87 %.

Обсуждение результатов

Использованный в эксперименте способ построения карты высот слоя угля имеет погрешность, так как работа ведется с насыпным материалом переменной фракции, соответственно, при проведении измерения часто происходят смещения частиц. Несмотря на это представленный выше подход показывает точность при прямом расчете объема с относительной погрешностью менее 14 %. Применение измерений с проходом в два противоположных направления относительно поперечного сечения измерительного участка с последующим усреднением результата позволяет снизить относительную погрешность для данного случая практически на 5 %. Результат в 5 % является непостоянной величиной и зависит от распределения объема угля относительно поперечного сечения измерительного участка. Относительная погрешность менее 10 % при имеющейся точности измерений для построения карты высот говорит о достаточной для инженерного использования точности предложенного способа расчета и небольшом влиянии погрешностей отдельных измерений на общий результат расчета объема.

На данный момент времени, учитывая результаты валидации, можно составить формулу расчета производительности питателя, кг/с, подставив (8) в (2). Тогда:

$$P_{\text{пит.кг/с}} = \frac{\left(\sum_{y=1}^{y_2-1} \sum_{x=1}^{x_2} h_{x,y} + \sum_{x=1}^{x_2} h_{x,y_2-1} + \sum_{y=2}^{y_2} \sum_{x=1}^{x_2} h_{x,y} + \sum_{x=1}^{x_2} h_{x,2} \right) YX}{2} \rho_{\text{уг}} T_{\text{сиг}}. \quad (9)$$

Полученная формула (9) позволила начать разработку программного обеспечения для машинного зрения, измеряющего высоту слоя угля в точках пересечения световых маркеров.

Заключение

Предложенный способ позволяет проводить оперативную оценку объема горной массы, перемещаемой пластинчатым питателем с использованием технологий машинного зрения. Решена задача контроля объема выпускаемого питателем угля при отработке мощных пластов лавными комплексами с выпуском на забойный конвейер с точностью, достаточной для практического применения. Разработанный математический аппарат для расчетов единичного объема угля на измерительном участке (формула (8)) и измерения производительности питателя (формула (9)) позволяет создавать алгоритмическое обеспечение с использованием элементарных математических функций: сложение, вычитание, умножение и деление. Данный аспект важен, так как снижает планку требований к среде разработки программного обеспечения, а соответственно, расширяет номенклатуру аппаратных средств, пригодных для выполнения задач расчета производительности питателя.



Список литературы

1. Клишин В.И., Анферов Б.А., Кузнецова Л.В. Направления совершенствования разработки мощных пластов с выпуском угля подкровельной толщи. В: *Инновации в топливно-энергетическом комплексе и машиностроении (ТЭК-2017). Сборник трудов Международной научно-практической конференции*. Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева; 2017. С. 57–63.
2. Клишин В.И., Клишин С.В. Состояние и направление развития технологии разработки мощных угольных пластов механизированными крепями с выпуском. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2019;(1):162–174.
3. Peng S. S. *Longwall mining*. 3rd edition. Leiden: CRC Press/Balkema; 2020. 562 p.
4. Le T.D., Mitra R., Oh J., Hebblewhite B. A review of cavability evaluation in longwall top coal caving. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2017;27(6):907–915. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2017.06.021>
5. Mundry S., Sandgathe C. Automated Cat longwall top coal caving. In: *Efficient Mining of High Seams with Automated LTCC Operations*. Caterpillar Inc.; 2018. Pp. 12–14. URL: <http://s7d2.scene7.com/is/content/Caterpillar/CM20180716-40601-27335> (Дата обращения: 01.08.2022).
6. Medhurst T., Rankine R., Kelly M. Development of a method for a longwall top coal caveability assessment. In: *Coal operators' conference*. 12–14 February 2014. Wollongong: University of Wollongong; 2014. Pp. 42–50. URL: <https://ro.uow.edu.au/cgi/viewcontent.cgi?article=2159&context=coal>
7. Le T. D. *Longwall Top Coal Caving mechanism and cavability assessment*. [PhD thesis in Mining Engineering]. Sydney; 2018. <https://doi.org/10.26190/unsworks/20236>
8. Клишин В.И., Шундулиди И.А., Ермаков А.Ю., Соловьев А.С. *Технология разработки запасов мощных пологих пластов с выпуском угля*. Новосибирск: Наука; 2013. 248 с.
9. Клишин В.И., Опрук Г.Ю., Варфоломеев Е.Л., Борисов И.Л. Взаимодействие механизированных крепей с межслоевой толщиной в системах с выпуском угля. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2018;(S48):87–94. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-11-48-87-94>
10. Кизилов С.А., Никитенко М.С., Неоджи Б. и др. Автоматизация управления технологическими процессами при отработке мощных пластов с выпуском угля подкровельной толщи. *Горная промышленность*. 2017;(6):96–99. URL: <https://mining-media.ru/en/articles/articleen/13196-automation-of-process-control-in-thick-seam-mining-with-top-coal-caving>
11. Nikitenko M. S., Kizilov S. A., Nikolaev P. I., Kuznetsov I. S. Technical devices of powered roof support for the top coal caving as automation objects. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. XI All-Russian Scientific and Practical Conference (with international participation) "Automation systems in education, science and production, 2017"*. 14–16 December 2017, Novokuznetsk, Russian Federation. 2017;354:012014. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/354/1/012014>
12. Nikitenko M. S., Kizilov S. A. Technical and technological platforms for creating robotized complexes for the development of thick seam deposits. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Volume 377, International Scientific and Research Conference on Knowledge-based technologies in development and utilization of mineral resources*. 4–7 June 2019, SibSIU, Novokuznetsk, Russia. 2019;377:012033. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/377/1/012033>
13. Стародубов А.Н., Зиновьев В.В., Клишин В.И., Крамаренко В.А. Применение имитационного моделирования для исследования режимов выпуска угля подкровельной толщи. В: *9-я всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности*. Екатеринбург; 2019. С. 540–547. URL: <http://simulation.su/uploads/files/default/2019-immmod-540-547.pdf>
14. Starodubov A., Sinoviev V., Totskiy A., Klishin V. Review of mining equipment with controlled robotized subvel caving with specialized software. In: *E3S Web of Conferences. Vth International Innovative Mining Symposium*. 2020;174:03012. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017403012>
15. Starodubov A. N., Sinoviev V. V., Klishin V. I. The development of simulating system of robotized technologies for thick and acute coal seams. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;1749(1):012040. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1749/1/012040>
16. Heyduk A. Bulk density estimation using a 3-dimensional image acquisition and analysis system. In: *E3S Web of Conferences. Mineral Engineering Conference MEC2016*. 2016;8:01060. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20160801060>
17. Heyduk A. Laser triangulation in 3-dimensional granulometric analysis. *Archives of Mining Sciences*. 2016;61(1):15–27. <https://doi.org/10.1515/amsc-2016-0002>
18. Min F., Lou A., Wei Q. Design and experiment of dynamic measurement method for bulk material of large volume belt conveyor based on laser triangulation method. In: *IOP Conference Series Materials Science and Engineering. 7th Annual International Conference on Material Science and Environmental Engineering*. 15–16 November 2019. Wuhan, Hubei, China. 2020;735(1):012029. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/735/1/012029>
19. Fojtík D. Measurement of the volume of material on the Conveyor Belt measuring of the volume of wood chips during transport on the Conveyor Belt using a laser scanning. In: *Proceedings of the 2014 15th International Carpathian Control Conference (ICCC)*. 28–30 May 2014. Velke Karlovice, Czech Republic. Pp. 121–124. <https://doi.org/10.1109/CarpathianCC.2014.6843581>
20. Amorim L.L., Mutz F., De Souza A.F. et al. Simple and effective load volume estimation in moving trucks using lidars. In: *32nd SIBGRAPI Conference on Graphics, Patterns and Images (SIBGRAPI)*. 28–30 October 2019. Rio de Janeiro, Brazil. Pp. 210–217. <https://doi.org/10.1109/SIBGRAPI.2019.00036>



21. Zeng F., Wu Q., Chu X., Yue Z. Measurement of bulk material flow based on laser scanning technology for the energy efficiency improvement of belt conveyors. *Measurement*. 2015;75:230–243. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.05.041>
22. Dunn M., Reid P., Malos J. Development of a protective enclosure for remote sensing applications—case study: laser scanning in underground coal mines. *Resources*. 2020;9(5):56. <https://doi.org/10.3390/resources9050056>
23. Macpherson T., Churchland A., Sejnowski T. et al. Natural and artificial intelligence: a brief introduction to the interplay between AI and neuroscience research. *Neural Networks*. 2021;144:603–613. <https://doi.org/10.1016/j.neunet.2021.09.018>
24. Акулов М.С., Гладких С.А., Ланкина М.Ю., Бакланов А.Н. Обработка фото и видеоизображений с помощью нейронных сетей в программе LABVIEW. *Современные наукоемкие технологии*. 2019;(3–1):12–17. URL: <https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=37434>

References

1. Klishin V.I., Afyrov B.A., Kuznetsova L.V. Areas of improving development of thick seams with drawing of the coal from under the roof strata. In: *Innovations in Fuel and Energy Complex and Mechanical Engineering (FEC-2017). Proceedings of the International Scientific and Practical Conference*. Kemerovo: T.F. Gorbachev State Technical University; 2017. Pp. 57–63. (In Russ.)
2. Klishin V.I., Klishin S.V. Current state and direction of development of thick coal seams exavation technology by powered roof supports with controlled coal discharge. *Izvestija Tulsogo Gosudarstvennogo Universiteta. Nauki o Zemle*. 2019;(1):162–174. (In Russ.)
3. Peng S. S. *Longwall mining*. 3rd edition. Leiden: CRC Press/Balkema; 2020. 562 p.
4. Le T.D., Mitra R., Oh J., Hebblewhite B. A review of cavability evaluation in longwall top coal caving. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2017;27(6):907–915. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2017.06.021>
5. Mundry S., Sandgathe C. Automated Cat longwall top coal caving. In: *Efficient Mining of High Seams with Automated LTCC Operations*. Caterpillar Inc.; 2018. Pp. 12–14. URL: <http://s7d2.scene7.com/is/content/Caterpillar/CM20180716-40601-27335> (Accessed: 01.08.2022).
6. Medhurst T., Rankine R., Kelly M. Development of a method for a longwall top coal caveability assessment. In: *Coal operators' conference*. 12–14 February 2014. Wollongong: University of Wollongong; 2014. Pp. 42–50. URL: <https://ro.uow.edu.au/cgi/viewcontent.cgi?article=2159&context=coal>
7. Le T.D. *Longwall Top Coal Caving mechanism and cavability assessment*. [PhD thesis in Mining Engineering]. Sydney; 2018. <https://doi.org/10.26190/unsworks/20236>
8. Klishin V.I., Shundulidi I.A., Ermakov A. Yu., Soloviev A. S. *Technique for development of reserves of thick shallow seams with coal discharge*. Novosibirsk: Nauka Publ.; 2013. 248 p. (In Russ.)
9. Klishin V.I., Opruk G. Yu., Varfolomeev E.L., Borisov I.L. Interaction of mechanized support with interlayer thickness in systems with subvel caving. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2018;(S48):87–94. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-11-48-87-94>
10. Kizilov S.A., Nikitenko M. S., Neodzhy B. et al. Automation of process control in thick seam mining with top coal caving. *Russian Mining Industry*. 2017;(6):96–99. (In Russ.) URL: <https://mining-media.ru/en/articles/article/13196-automation-of-process-control-in-thick-seam-mining-with-top-coal-caving>
11. Nikitenko M. S., Kizilov S.A., Nikolaev P.I., Kuznetsov I. S. Technical devices of powered roof support for the top coal caving as automation objects. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. XI All-Russian Scientific and Practical Conference (with international participation) "Automation systems in education, science and production, 2017"*. 14–16 December 2017, Novokuznetsk, Russian Federation. 2017;354:012014. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/354/1/012014>
12. Nikitenko M.S., Kizilov S.A. Technical and technological platforms for creating robotized complexes for the development of thick seam deposits. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Volume 377, International Scientific and Research Conference on Knowledge-based technologies in development and utilization of mineral resources*. 4–7 June 2019, SibSIU, Novokuznetsk, Russia. 2019;377:012033. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/377/1/012033>
13. Starodubov A. N., Sinoviev V. V., Klishin V. I., Kramarenko V. A. Application of simulating modeling for research of subvel caving modes. In: *9th All-Russian Scientific and Practical Conference on Simulation Modeling and its Application in Science and Industry*. Yekaterinburg; 2019. Pp. 540–547. (In Russ.) URL: <http://simulation.su/uploads/files/default/2019-immmod-540-547.pdf>
14. Starodubov A., Sinoviev V., Totskiy A., Klishin V. Review of mining equipment with controlled robotized subvel caving with specialized software. In: *E3S Web of Conferences. Vth International Innovative Mining Symposium*. 2020;174:03012. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017403012>
15. Starodubov A.N., Sinoviev V.V., Klishin V.I. The development of simulating system of robotized technologies for thick and acute coal seams. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;1749(1):012040. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1749/1/012040>
16. Heyduk A. Bulk density estimation using a 3-dimensional image acquisition and analysis system. In: *E3S Web of Conferences. Mineral Engineering Conference MEC2016*. 2016;8:01060. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20160801060>



17. Heyduk A. Laser triangulation in 3-dimensional granulometric analysis. *Archives of Mining Sciences*. 2016;61(1):15–27. <https://doi.org/10.1515/amsc-2016-0002>
18. Min F., Lou A., Wei Q. Design and experiment of dynamic measurement method for bulk material of large volume belt conveyor based on laser triangulation method. In: *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 7th Annual International Conference on Material Science and Environmental Engineering. 15–16 November 2019. Wuhan, Hubei, China. 2020;735(1):012029. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/735/1/012029>
19. Fojtik D. Measurement of the volume of material on the Conveyor Belt measuring of the volume of wood chips during transport on the Conveyor Belt using a laser scanning. In: *Proceedings of the 2014 15th International Carpathian Control Conference (ICCC)*. 28–30 May 2014. Velke Karlovice, Czech Republic. Pp. 121–124. <https://doi.org/10.1109/CarpathianCC.2014.6843581>
20. Amorim L.L., Mutz F., De Souza A.F. et al. Simple and effective load volume estimation in moving trucks using lidars. In: *32nd SIBGRAPI Conference on Graphics, Patterns and Images (SIBGRAPI)*. 28–30 October 2019. Rio de Janeiro, Brazil. Pp. 210–217. <https://doi.org/10.1109/SIBGRAPI.2019.00036>
21. Zeng F., Wu Q., Chu X., Yue Z. Measurement of bulk material flow based on laser scanning technology for the energy efficiency improvement of belt conveyors. *Measurement*. 2015;75:230–243. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.05.041>
22. Dunn M., Reid P., Malos J. Development of a protective enclosure for remote sensing applications—case study: laser scanning in underground coal mines. *Resources*. 2020;9(5):56. <https://doi.org/10.3390/resources9050056>
23. Macpherson T., Churchland A., Sejnowski T. et al. Natural and artificial intelligence: a brief introduction to the interplay between AI and neuroscience research. *Neural Networks*. 2021;144:603–613. <https://doi.org/10.1016/j.neunet.2021.09.018>
24. Akulov M.S., Gladkikh S.A., Lankina M. Yu., Baklanov A.N. Processing photos and videos by using neural networks in the LABVIEW program. *Sovremennyye Naukoyemkiye Tekhnologii*. 2019;(3–1):12–17. (In Russ.) URL: <https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=37434>

Информация об авторах

Михаил Сергеевич Никитенко – кандидат технических наук, заведующий лабораторией, Федеральный исследовательский центр угля и углекислоты Сибирского отделения Российской академии наук (ФИЦ УУХ СО РАН), г. Кемерово, Российская Федерация; ORCID [0000-0001-8752-1332](https://orcid.org/0000-0001-8752-1332), Scopus ID [55748886500](https://scopus.com/authorid/55748886500), ResearcherID [E-3893-2014](https://orcid.org/E-3893-2014); e-mail [ltd.mseng@gmail.com](mailto:mseng@gmail.com)

Сергей Александрович Кизилев – научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр угля и углекислоты Сибирского отделения Российской академии наук (ФИЦ УУХ СО РАН), г. Кемерово, Российская Федерация; ORCID [0000-0003-2554-1383](https://orcid.org/0000-0003-2554-1383), Scopus ID [57203142801](https://scopus.com/authorid/57203142801); e-mail sergkizilov@gmail.com

Юрий Николаевич Захаров – доктор физико-математических наук, профессор, Кемеровский государственный университет (КемГУ), г. Кемерово, Российская Федерация; Scopus ID [56825350700](https://scopus.com/authorid/56825350700); e-mail zaharovyn@yandex.ru

Данила Юрьевич Худоногов – научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр угля и углекислоты Сибирского отделения Российской академии наук (ФИЦ УУХ СО РАН), г. Кемерово, Российская Федерация; e-mail admolv@gmail.com

Алла Юрьевна Игнатова – кандидат биологических наук, доцент кафедры химической технологии твердого топлива и экологии, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева (КузГТУ), г. Кемерово, Российская Федерация; ORCID [0000-0001-8061-8684](https://orcid.org/0000-0001-8061-8684), Scopus ID [6701747560](https://scopus.com/authorid/6701747560); e-mail allaignatova@rambler.ru

Information about the authors

Mikhail S. Nikitenko – Cand. Sci. (Eng.), Head of Laboratory, Federal Research Center of Coal and Coal-Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kemerovo, Russian Federation; ORCID [0000-0001-8752-1332](https://orcid.org/0000-0001-8752-1332), Scopus ID [55748886500](https://scopus.com/authorid/55748886500), ResearcherID [E-3893-2014](https://orcid.org/E-3893-2014); e-mail: ltd.mseng@gmail.com

Sergey A. Kizilov – Researcher, Federal Research Center of Coal and Coal-Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kemerovo, Russian Federation; ORCID [0000-0003-2554-1383](https://orcid.org/0000-0003-2554-1383), Scopus ID [57203142801](https://scopus.com/authorid/57203142801); e-mail sergkizilov@gmail.com

Yuri N. Zakharov – Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professor, Kemerovo State University, Kemerovo, Russian Federation; Scopus ID [56825350700](https://scopus.com/authorid/56825350700); e-mail zaharovyn@yandex.ru

Danila Yu. Khudonogov – Researcher, Federal Research Center of Coal and Coal-Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kemerovo, Russian Federation; e-mail: admolv@gmail.com

Alla Yu. Ignatova – Cand. Sci. (Biol.), Associate Professor of the Department of Chemical Technology of Solid Fuels and Ecology, T.F. Gorbachev State Technical University, Kemerovo, Russian Federation; ORCID [0000-0001-8061-8684](https://orcid.org/0000-0001-8061-8684), Scopus ID [6701747560](https://scopus.com/authorid/6701747560); e-mail allaignatova@rambler.ru

Поступила в редакцию	29.09.2022	Received	29.09.2022
Поступила после рецензирования	15.10.2022	Revised	15.10.2022
Принята к публикации	23.10.2022	Accepted	23.10.2022



ГЕОЛОГИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Обзорная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-04-07>

УДК 622.276

**Новые технологии прогноза и поисков залежей углеводородов с целью повышения эффективности геологоразведочных работ в Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции****Н. П. Демченко¹ , В. Б. Ростовщиков¹ , И. В. Колоколова²  ,
И. А. Маракова¹ , Д. С. Волков³**¹ Ухтинский государственный технический университет, г. Ухта, Российская Федерация² Институт проблем нефти и газа Российской академии наук (ИПНГ РАН), г. Москва, Российская Федерация³ Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, г. Москва, Российская Федерация ipngkolokolova@yandex.ru**Аннотация**

Тимано-Печорская нефтегазоносная провинция остается достаточно перспективной для открытия новых месторождений и залежей углеводородов, в том числе крупных. В то же время в последние годы отмечается низкая эффективность поисково-разведочных работ на нефть и газ. При относительно высокой разведанности прогнозных ресурсов по нефти (> 50 %) и невысокой по газу (около 30 %) поиск новых месторождений и залежей смещается в сторону нестандартных геологических условий их залегания. Это, в свою очередь, требует разработки новых методик и технологий освоения таких ресурсов, построения моделей углеводородных систем и конкретных залежей, отражающих нестандартные условия их залегания и строения, а также усложнение поискового процесса. Поэтому определение рациональных методических подходов к прогнозированию, поискам и разведке залежей углеводородов представляет собой актуальную научную и прикладную задачу.

Комплексный анализ геолого-геофизических характеристик объектов по материалам современной сейсморазведки и бурения обеспечивает картирование геофизическими методами сложностроенных ловушек и более точную оценку прогнозируемых ресурсов и запасов обнаруженных залежей. Комплексирование и анализ материалов геолого-геофизических исследований с применением прогрессивных методик и технологий позволяют значительно расширить нефтегазовые перспективы, оптимизировать процессы поисков продуктивных ловушек и повысить эффективность геологоразведочных работ за счет рисков снижения непродуктивных скважин.

В статье авторы рассмотрели варианты прогноза нефтегазоносности и дали рекомендации поисков залежей углеводородов с применением современных методов и технологий интерпретации геолого-геофизических данных. Объектами исследований являлись терригенные и карбонатные природные резервуары северо-восточной части Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции, включая шельф Печорского моря, Ижма-Печорской и Хорейверской впадин, расположенных в разных структурно-тектонических зонах. Анализ обширной геологической информации показал, что на этих площадях есть все необходимые условия существования уникальных геологических объектов и возможность открытия в них нефтегазовых залежей.

Ключевые слова

Тимано-Печорская нефтегазоносная провинция, залежь углеводородов, ресурсы, коллектор, флюидопор, сейсморазведка, скважина

Благодарности

Статья написана в рамках выполнения Государственного задания по теме «Создание научных основ новой системы методологии прогноза, поисков и освоения залежей углеводородов, включая залежи матричной нефти в газонасыщенных карбонатных отложениях нефтегазоконденсатных месторождений» на 2022–2024 гг. Направление фундаментальных исследований 131. Раздел IX. Науки о земле. Номер государственной регистрации ФММЕ-2022-0006, 122022800274-8. Распоряжение Правительства РФ от 31 октября 2015 г. №2217-р.

Для цитирования

Demchenko N.P., Rostovshchikov V.B., Kolokolova I.V., Marakova I.A., Volkov D.S. New methods of predicting and prospecting/exploration of hydrocarbon deposits to improve exploration performance in the Timan-Pechora oil and gas province. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2022;7(4):274–286. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-04-07>



GEOLOGY OF MINERAL DEPOSITS

Review article

New methods of predicting and prospecting/exploration of hydrocarbon deposits to improve exploration performance in the Timan-Pechora oil and gas provinceN. P. Demchenko¹ , V. B. Rostovshchikov¹  , I. V. Kolokolova²   , I. A. Marakova¹ , D. S. Volkov³¹ *Ukhta State Technical University, Ukhta, Russian Federation*² *Institute of Oil and Gas Problems of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*³ *Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation* ipngkolokolova@yandex.ru**Abstract**

The Timan-Pechora oil and gas province remains rather promising for the discovery of new hydrocarbon fields and deposits, including large ones. However, in recent years, the efficiency of oil and gas prospecting and exploration has been rather low. At relatively high exploration maturity of prognostic oil resources (> 50%) and low exploration maturity of gas resources (about 30%), prospecting for new fields and deposits focuses on non-standard geological conditions of their occurrence. This, in turn, requires the development of new methods and technologies for the development of such resources and the simulation of hydrocarbon systems and specific deposits, reflecting their non-standard occurrence and structure, thereby making prospecting more complicated. Therefore, the determination of rational methodological approaches to prediction, prospecting, and exploration of hydrocarbon deposits represents an urgent scientific and applied task.

A comprehensive analysis of geological and geophysical characteristics of the promising targets based on the data of up-to-date seismic exploration and drilling ensures that complex traps are mapped by geophysical methods and prognostic resources and reserves of discovered deposits are estimated more precisely and confidently. Integration and analysis of geological and geophysical research materials using advanced methods and technologies can significantly expand oil and gas prospects and optimize the prospecting for productive traps and increase exploration efficiency by reducing the risk of unproductive wells.

This paper presents and discusses the options for predicting oil and gas potential and provides recommendations for prospecting hydrocarbon deposits using up-to-date methods and technologies for interpreting geological and geophysical data. The research targets were terrigenous and carbonate natural reservoirs in the northeastern part of the Timan-Pechora oil and gas province, including the shelf of the Pechora Sea, Izhma-Pechora and Khoreiver Basins situated in different structural and tectonic zones. The analysis of extensive geological information has revealed that these areas exhibit all the necessary conditions for the existence of unique geological features and the potential for the discovery of oil and gas deposits therein.

Keywords

Timan-Pechora oil and gas province, hydrocarbon deposit, resources, reservoir, impermeable bed, seismic exploration, well

Acknowledgments

The paper was prepared within the framework of the State Assignment on the topic “Creating the Scientific Foundations for a New Systematic Methodology for Predicting, Prospecting, and Developing Hydrocarbon Deposits, including Matrix Oil Deposits in Gas-Saturated Carbonate Sediments within Oil and Gas Condensate Fields” for 2022–2024. Basic research direction #131. Section IX. Earth Sciences, State registration number FMME-2022-0006, 122022800274-8. Order of the Government of the Russian Federation No. 2217-r of October 31, 2015.

For citation

Demchenko N.P., Rostovshchikov V.B., Kolokolova I.V., Marakova I.A., Volkov D.S. New methods of predicting and prospecting/exploration of hydrocarbon deposits to improve exploration performance in the Timan-Pechora oil and gas province. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2022;7(4):274–286. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-04-07>

Введение

Тимано-Печорская нефтегазоносная провинция является уникальной по сложности и многообразию геологических объектов и условиям их образования. Нефтегазоносность установлена почти повсеместно и по всему разрезу осадочного чехла – от ордовикских до мезозойских отложений включительно.

К основным направлениям в настоящее время поисков новых месторождений относятся:

а) по нефти:

– среднеордовикско-нижнедевонский нефтегазоносный комплекс с широким развитием неантиклинальных, структурно-стратиграфических, литологических, эрозионных ловушек в пределах



Большеземельского палеосвода, Денисовского прогиба, шельф Печорского моря;

– пермско-триасовый терригенный нефтегазоносный комплекс с широким развитием литологических ловушек дельтового генезиса в пределах северной части Тимано-Печорской провинции и ее арктическом продолжении;

– визейско-нижнепермский нефтегазоносный комплекс с биогермными, рифогенными и биостромными ловушками на всей территории Тимано-Печорской провинции и его арктическом продолжении;

б) по газу:

– главным объектом поисков является Предуральский краевой прогиб с широким развитием крупных структурно-тектонических ловушек в центральной и внутренней зоне прогиба;

– новым нетрадиционным направлением могут быть миогеосинклинальные зоны, скрытые под передовыми складками Урала [1].

Эти направления послужили основой для исследований и написания настоящей статьи. На трех примерах авторы представили алгоритм прогноза и поисков залежей углеводородов с применением современных методов и технологий интерпретации геолого-геофизических данных.

В процессе работ проанализировано и интерпретировано более 200 скважин, 30 тыс. пог. км сейсморазведки методом общей глубинной точки (МОГТ) – 2D, 900 км² – 3D.

Обработка использованных данных и соответствующие графические построения проводились с помощью современных геолого-математических и графических программных продуктов: Kingdom Suite фирмы SMT, Petrel (Shlumberger), IESX (Shlumberger Sparc GeoFrame), Paradigm Geophysical (Probe и Vanguard), Excel, CoreDRAW.

Результаты исследований

Пример 1. Применение историко-генетического метода для прогноза ловушек и залежей углеводородов

Оценка перспектив нефтегазоносности территории на основании историко-генетического метода лежит в основе практически всех технологий прогнозирования нефтегазоносности недр и широко используется как в России, так и в зарубежных странах. В развитие метода большой вклад внесли такие известные ученые, как А.П. Афанасенков, Л.И. Богородский, Л.Н. Болдушевский, И.П. Варламов, Г.Д. Гинзбург, А.И. Данюшевский, С.В. Ершов, Н.С. Ким, А.Э. Конторович, В.А. Конторович, Роберт Лоукс, Джон Долсен, Стефан М. Люти и др. Огромную роль сыграло применение историко-генетического метода в открытии и разработке таких месторождений, как Заполярное, Уренгойское, Медвежье, Ямбургское, Мессояхское, Солёнинское, Южно-Солёнинское, Пеляткинское, Ушаковское, Дерябинское, Ванкорская группа, Giddings, «Черный гигант» (Восточный Техас) и других месторождений на территориях штатов Техас, Луизианы и Миссисипи [2–4].

В статье авторы на основе изучения различных факторов формирования ловушек и залежей предлагают рассмотреть системный научный подход к историко-генетическому методу для прогноза ловушек и залежей углеводородов, который заключается в анализе событий, повлиявших в пермское и триасовое время на:

- 1) тектоно-динамическое развитие исследуемой территории;
- 2) процессы осадконакопления;
- 3) генерацию и аккумуляцию углеводородов;
- 4) реформирование залежей углеводородов в пермское и более позднее триасово-юрское время.

Объект исследования. Северо-восточная часть Тимано-Печорской провинции, терригенные отложения пермского возраста (рис. 1).

Осадконакопление берет начало от основного источника сноса терригенного материала в раннеартиновское время с Уральского орогена. Развитие орогенных процессов на Урале дало начало обширной регрессии, затем в каждый период времени вплоть до казанско-татарского времени происходила смена обстановок осадконакопления.

В региональном плане в раннеартиновское время происходило постепенное замещение карбонатного осадконакопления терригенным, создавались прибрежно-морские обстановки с карбонатно-терригенным осадконакоплением в пределах впадин Предуральского краевого прогиба, в центральной части Варандей-Адзвинской структурно-тектонической зоны и Колвинского мегавала шло накопление глубоководных, мелководно-морских осадков и образование органогенных построек. В районе современной Коротаихинской впадины существовали глубоководные обстановки осадконакопления. По мере развития терригенного осадконакопления по площади исследуемых территорий на протяжении пермского времени формируется новый седиментационный бассейн с прибрежно-морскими, дельтовыми и аллювиальными обстановками осадконакопления [5].

На зональном уровне рассматриваются седиментационный и постседиментационный подэтапы образования ловушек прибрежно-морского, руслового и дельтового происхождения в артиновско-кунгурское и уфимско-татарское время.

Пермские терригенные отложения в пределах Коротаихинской впадины являются одним из основных объектов для поиска залежей углеводородов. Полученный приток нефти из этих отложений в скважине 1-ВК (Воркутинская) свидетельствует об их высокой перспективности.

В исследуемой части Коротаихинской впадины временные разрезы в интервале, заключенном между отражающими горизонтами (ОГ) I-II и A-I, по волновой картине характеризуются клиноформной записью, которая отождествляется с формированием предположительно дельтовых пермских отложений (рис. 2).

Пермский терригенный клиноформный комплекс представляет собой систему проградационных клиноформ – циклитов, сформировавшихся в регрес-

сивную фазу пермского этапа эволюции бассейна, и связан с завершающей орогенной стадией герцинско-раннекиммерийского цикла.

Для исследования клиноформного комплекса были привлечены шесть скважин: 2-Западно-Коротаихинская, 1-, 2-Рифовые, 1-Воркутинская (ВК), 1-Хавдейская, 15-Лабогейская. Скважинная информация по ним неполная, отсутствуют в пермской части разреза данные: каротажа потенциалов самопроизвольной поляризации (ПС) – в скважине 2-Западно-Коротаихинская; акустического каротажа (АК) – в скважинах 1-Хавдейская, 1-ВК; НГК – в скважинах 1-Хавдейская, 1-ВК. На качестве имеющихся материалов геофизических исследований скважин отразились большие интервалы исследования и большой промежуток времени с момента вскрытия разреза до проведения промыслово-геофизических исследований. Недостаточное количество кернового материала также затрудняет проведение фациально-палеогеографического анализа этих отложений.

В связи с отсутствием в Тимано-Печорской провинции аналогов залежей в пермских клиноформных отложениях для выделения в них перспективных объектов использованы методика и поисковые критерии,

выработанные по результатам исследований клиноформных отложений Западной Сибири.

Клиноформный комплекс характеризуется сложным строением, что проявляется в изменчивости отражений от профиля к профилю, сложных взаимоотношений отражений в области шельфа, склона и его подножья, в изменчивости клиноформ по простиранию, проявляющейся в обособлении локально развитых зон увеличенных мощностей – депоцентров.

Наличие депоцентров указывает на существование питающего каньона, по которому объем привнесённого осадочного материала был более значительный по сравнению с периферией, а их конфигурация и простирание – на различную интенсивность их переработки и перемещения течениями вдоль склона.

В пределах депоцентра клиноформы, образованной ОГ Р-ХIV и Р-ХIII, пробурена 2-Западно-Коротаихинская скважина (рис. 3). По керну (долбления 4–7, интервал 2355,2–2416,3 м) разрез сложен в основном переслаиванием алевролитов, плотных, крепких и аргиллитов песчанистых с прослоями песчаников.

Сигмоидная сейсмическая граница Р-ХIV, облегающая данную клиноформу, выражена уверенно и четко. По геофизическим исследованиям скважин с этим

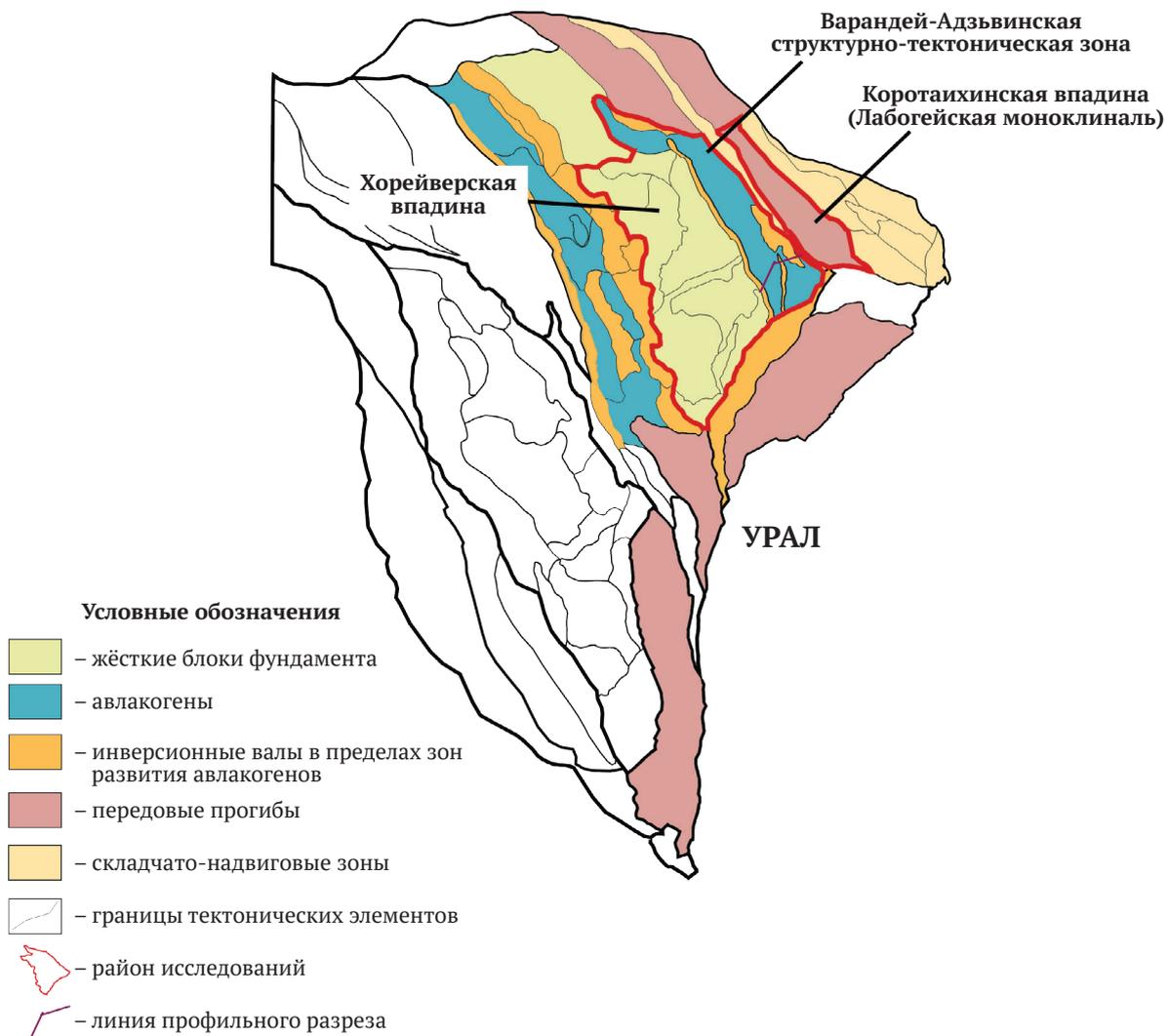


Рис. 1. Обзорная карта исследуемой площади (составила И. А. Маракова)

отражением отождествляется кровля пласта песчаника (2323–2334 м). Об емкостных свойствах выделенного песчаника и его характере насыщения судить сложно, так как этот интервал характеризуется неполным комплексом геофизических исследований скважин, отсутствием керна и испытания в скважинах.

В пределах этой клиноформы в скважине отмечается наличие пластов песчаника небольшой мощности (интервал 2362–2376,4 м), насыщенных по редким порам битумоподобной вязкой нефтью.

Согласно расчетам Коми НЦ УрО РАН (Коми Научный Центр Уральское отделение Российской академии наук) [6] и ВНИГРИ (Всероссийский нефтяной научно-исследовательский геологоразведочный институт) [7] в табл. 1 представлены масштабы эмиграции из нефтематеринских горизонтов Тимано-Печорского седиментационного бассейна (ТПСБ) и распределение объемов эмиграции жидких и газообразных углеводородов по отложениям пермского возраста в Коротаихинской впадине.

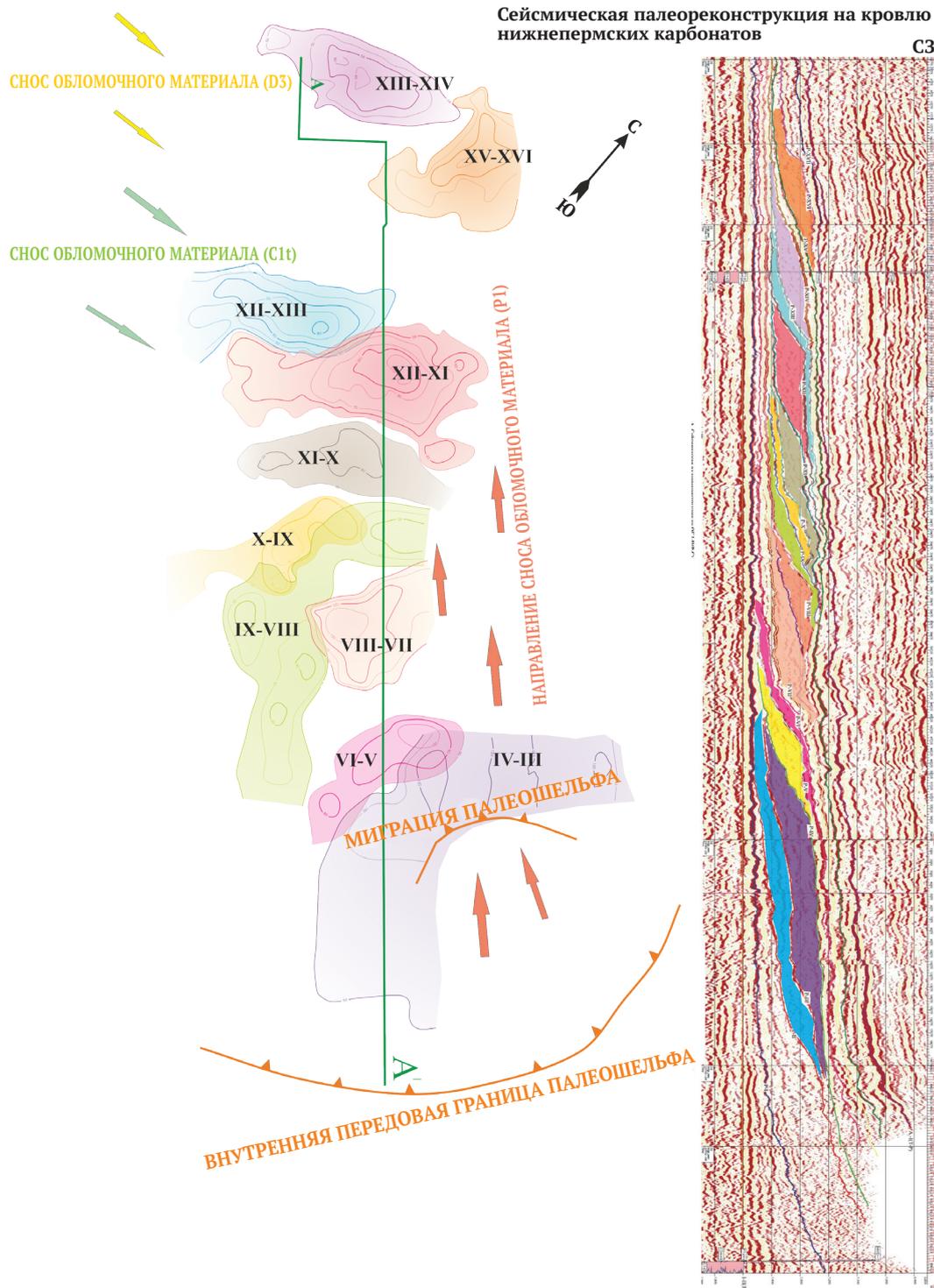


Рис. 2. Модель формирования проградационного комплекса (по материалам ОАО «Севергеофизика»)

Масштабы эмиграции углеводородов в Коротаихинской впадине были настолько велики, что даже при крайне низких коэффициентах сохранности углеводородов ожидается сохранение значительных ресурсов нефти и газа. Перспективы нефтегазоносности изучаемых отложений пермского возраста в Коротаихинской впадине подтверждаются и по результатам бассейнового моделирования [8].

В пределах Лабогейской моноклинали, Вашуткина-Талогинского надвига прогнозируется крупная зона нефтенакпления, далее простирающаяся в Сарембой-Леккейягинскую зону в стратиграфическом диапазоне от верхнего девона до триаса. Подтверждением этому являются многочисленные проявления из отложений пермского возраста, битумонасыщение и примазки бурой окисленной нефти по керну из интервалов девонского и пермского возрастов.

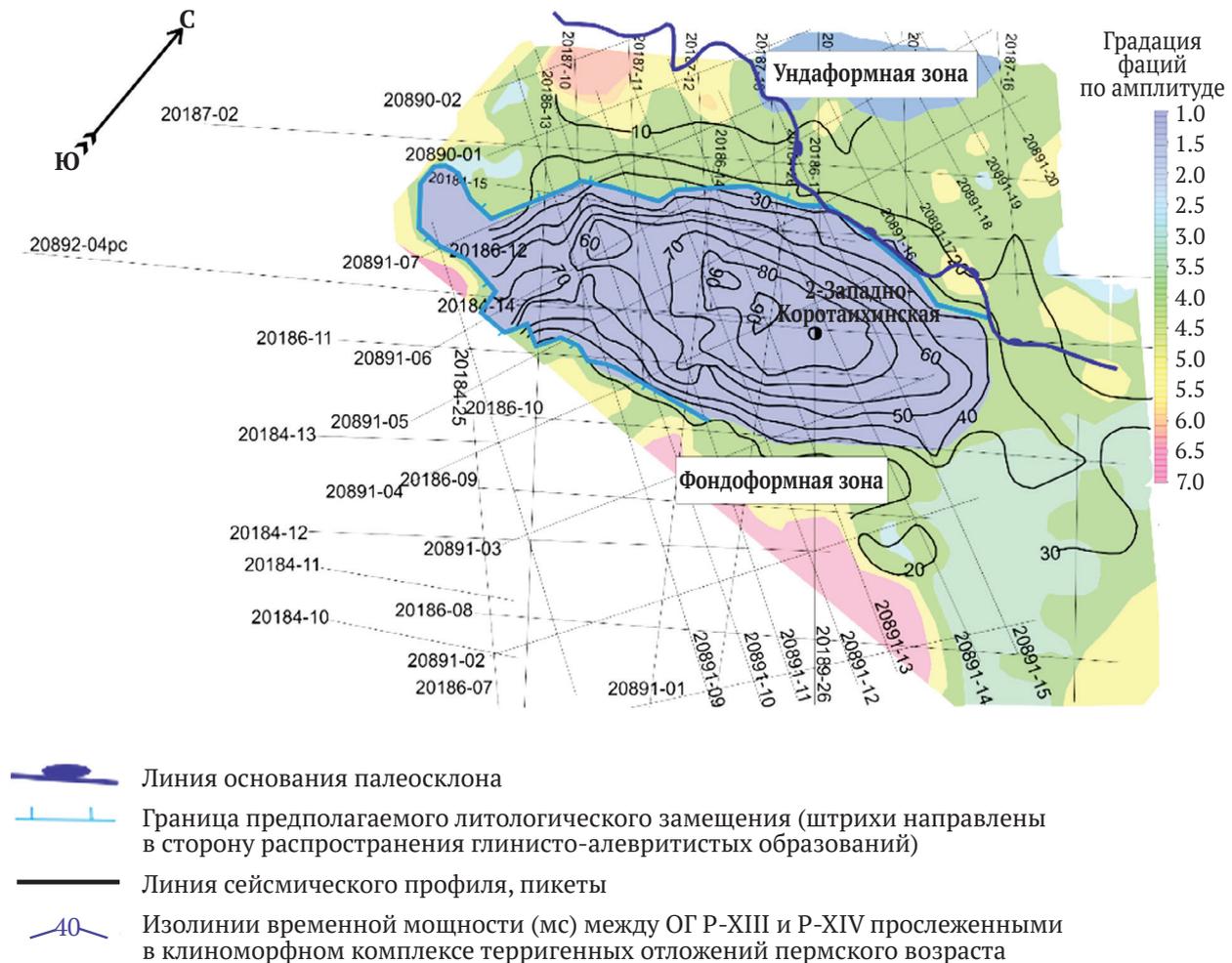


Рис. 3. Карта сейсмических фаций (по материалам ОАО «Севергеофизика»)

Таблица 1

Масштабы эмиграции из нефтематеринских горизонтов ТПСБ и распределение объемов эмиграции жидких и газообразных углеводородов Коротаихинской впадины

Возраст НГМГ	Масштабы эмиграции УВ		Плотность эмиграции		Отложения					
	нефти, млрд т	газа, трлн м ³	нефти, млн т/км ²	газа, млрд нм ³ /км ²	P _{1ar}		P _{1k}		P _{1u}	
					Нефть, млрд т	Газ, трлн м ³	Нефть, млрд т	Газ, трлн м ³	Нефть, млрд т	Газ, трлн м ³
S ₁ + S ₂ + D _{1l}	568,2	220,7	0,024–14,559	0,005–5,611						
D ₂	167,3	66,4	0,013–3,256	0,011–1,309						
D _{3tm-sr}	109,2	44,4	0,016–1,850	0,014–0,713	4,8	52,24	3,25	37,88	2,9	24,96
D _{3 Dm (sm)-C_{1t}}	410,5	114,8	0,033–7,890	0,01–2,458						
P _{1ar-k}	172,4	124,5	0,004–7,092	0,008–8,982						
Σ	1427,6	570,8	–	–	4,8	52,24	3,25	37,88	2,9	24,96



Выводы. Результаты динамического анализа сигмоидных сейсмических границ (карты сейсмофаций), облекающих клиноформы, позволили наметить три возможные литологически ограниченные ловушки, одна из которых расположена в фондоформной подзоне, вторая – в шельфовой и клиноформной подзоне, третья – в шельфовой подзоне.

Для выделения литологически ограниченной ловушки, образованной в шельфовой и клиноформной подзоне, привлекались данные по скважине 2-Западно-Коротайхинская, в которой пласт песчаника из интервала 2323–2334 м отождествляется с отражающим горизонтом Р-Х IV. Размеры данной ловушки составляют 24×10 км.

Третья литологически ограниченная ловушка в шельфовой подзоне выделена по аналогии с ловушкой по отражающему горизонту Р-ХIV.

С целью изучения фациальных особенностей и перспектив нефтегазоносности клиноформного сейсмокомплекса необходимо пробурить три скважины. Этот профиль из трех скважин позволит получить принципиально новые данные о строении клиноформ и закартировать в будущем зону возможно нефтенасыщенных коллекторов, связанных с бровкой шельфа, и установленных по каротажу в скважине 2-Западно-Коротайхинская.

Извлекаемые ресурсы по объекту в пределах исследуемой площади по кат. Дл оценены в 18 213 тыс. т извлекаемых и повышают перспективы исследуемой площади на 30 %.

Пример 2. Применение результатов динамического анализа материалов МОГТ-3D при прогнозе зон распространения коллекторов на малоизученных бурением площадях

Объекты исследования. Участки, расположенные в пределах сочленения Варандей-Адзвинской структурной зоны и Хорейверской впадины (северо-восточная часть шельфа Печорского моря). На объектах исследования (участки А и В) выполнена съемка МОГТ-3D в объеме 600 км² и пробурены скважины А-1 и В-1, вскрывшие отложения нижнего силура и карбона соответственно.

Перспективные отложения. Верхнепермские терригенные пласты казанско-татарского яруса, верхнекаменноугольно-нижнепермские карбонатные пласты ассельско-сакмарского яруса и силурийские карбонатные. Нефтегазоносность этих отложений доказана на многих месторождениях Тимано-Печорского нефтегазоносного бассейна и подтверждается притоками углеводородов скважин А-1 и В-1 на площади работ.

Для оценки выявленных перспектив фильтрационно-емкостных свойств в зоне коллекторов и содержания углеводородов выполнены следующие исследования:

1. Комплексный анализ скважинных данных (геофизические исследования скважин, результаты испытаний, опробования, бурения).

2. Обзор петрофизических свойств горных пород (поиск корреляционных зависимостей между атрибутами и петрофизическими параметрами).

3. Структурная интерпретация: корреляция отражающих горизонтов, выделение дизъюнктивных нарушений, построение карт изохрон, выделение аномалий сейсмической записи.

4. Выполнение атрибутного анализа для прогноза зон развития высокоемких коллекторов в целевых интервалах разреза [9, 10].

Изменение петрофизических свойств горных пород, характера их насыщения и литологического состава находит отражение как в фактическом материале (керна, шлам, шлифы), так и в кривых данных геофизических исследований скважин. Комплексный анализ скважинной информации (А-1, В-1) не позволяет уверенно разделить облако точек коллектора и неколектора, а также выявить надежные корреляционные зависимости упругих и петрофизических свойств горных пород с целью распространения фильтрационно-емкостных свойств в межскважинном пространстве по причине ограниченного набора данных геофизических исследований скважин.

Ввиду малой изученности площади бурением дополнительно рассмотрены случаи изменения объема порового пространства терригенных отложений верхней перми по результатам петроупругого моделирования на основе уравнений Гассмана (рис. 4). В качестве априорной информации использованы средние значения коэффициентов пористости Хорейверского ($K_n = 26\%$) и Лемъюского ($K_n = 21\%$) месторождений-аналогов, разрабатываемых на суше. Установлено, что при случае нахождения коллектора с пористостью 21 % точки коллектора и неколектора продолжают перекрываться, при значениях пористости порядка 26 % – слабо проявляется отличие между коллектором и неколектором в поле акустического импеданса.

Следовательно, на площади возможно наличие зон распространения коллекторов с предполагаемыми по моделированию значениями пористости, но в поле упругих параметров они с большей вероятностью не проявятся («пропуск цели»).

Хаотичность распределения точек коллектора и неколектора на кросс-плотах в перспективных интервалах карбонатной части разреза обусловлена недостатком площадных скважинных данных и сложностью строения коллектора, что не позволяет качественно выполнить моделирование и оценить возможность прогноза свойств горных пород в межскважинном пространстве.

В данном случае по результатам комплексного анализа скважинных данных невозможно выполнение количественного прогноза фильтрационно-емкостных свойств в межскважинном пространстве по имеющимся материалам динамического анализа сейсмических данных МОГТ-3D. Здесь применима только методика качественной интерпретации с использованием атрибутов волнового поля, где результаты акустической инверсии являются дополнительным атрибутом, характеризующим акустическую жесткость пласта.

Использование методики атрибутного анализа позволяет выделить и проследить некоторые аномалии, отождествляемые с геологическими объектами,

которые потенциально могут быть ловушками углеводородов на изучаемых площадях. Дополнительное применение метода аналогии и априорной геологической информации даёт возможность выполнить обобщенную интерпретацию выделенных сейсмofациальных единиц, которые имеют подтверждение на сейсмических разрезах.

Результаты динамического анализа сейсмических данных МОГТ-3D приведены на рис. 5. Установлено:

в верхнепермском интервале разреза – система разветвленных русловых тел северо-восточного простирания. Выявлена аллювиальная долина северо-западного простирания, сформированная на рубеже пермского и триасового периодов на площади А. Установлена русловая природа продуктивного песчаного пласта площади В и закартирована область его распространения;

в верхнекаменноугольно-нижнепермском интервале разреза – границы распространения карбонатной платформы с органогенными постройками типа «пинакл», выявлены зоны карстования;

в интервале силурийских отложений – выделены аномалии типа «палеоврез», сформировавшиеся в раннедевонское время, разрывные нарушения и зоны срезания продуктивного горизонта. Ниже по разрезу обнаружен продуктивный объект (получен непромышленный приток нефти), интерпретируемый как органогенная постройка. Объект расположен в приподнятом блоке, что достаточно характерно с геологической точки зрения для развития карбонатных построек в подобных условиях.

Выводы. Полученные результаты позволили иначе оценить перспективы площади. Построены детальные структурно-тектонические модели перспективных отложений, выполнен качественный прогноз зон с улучшенными фильтрационно-емкостными свойствами, выделены дополнительные объекты поисков залежей углеводородов, ресурсная база объекта увеличена вдвое, снижен риск бурения пустых скважин. Это доказывает эффективность применения динамического анализа на всех этапах геологоразведочных работ.

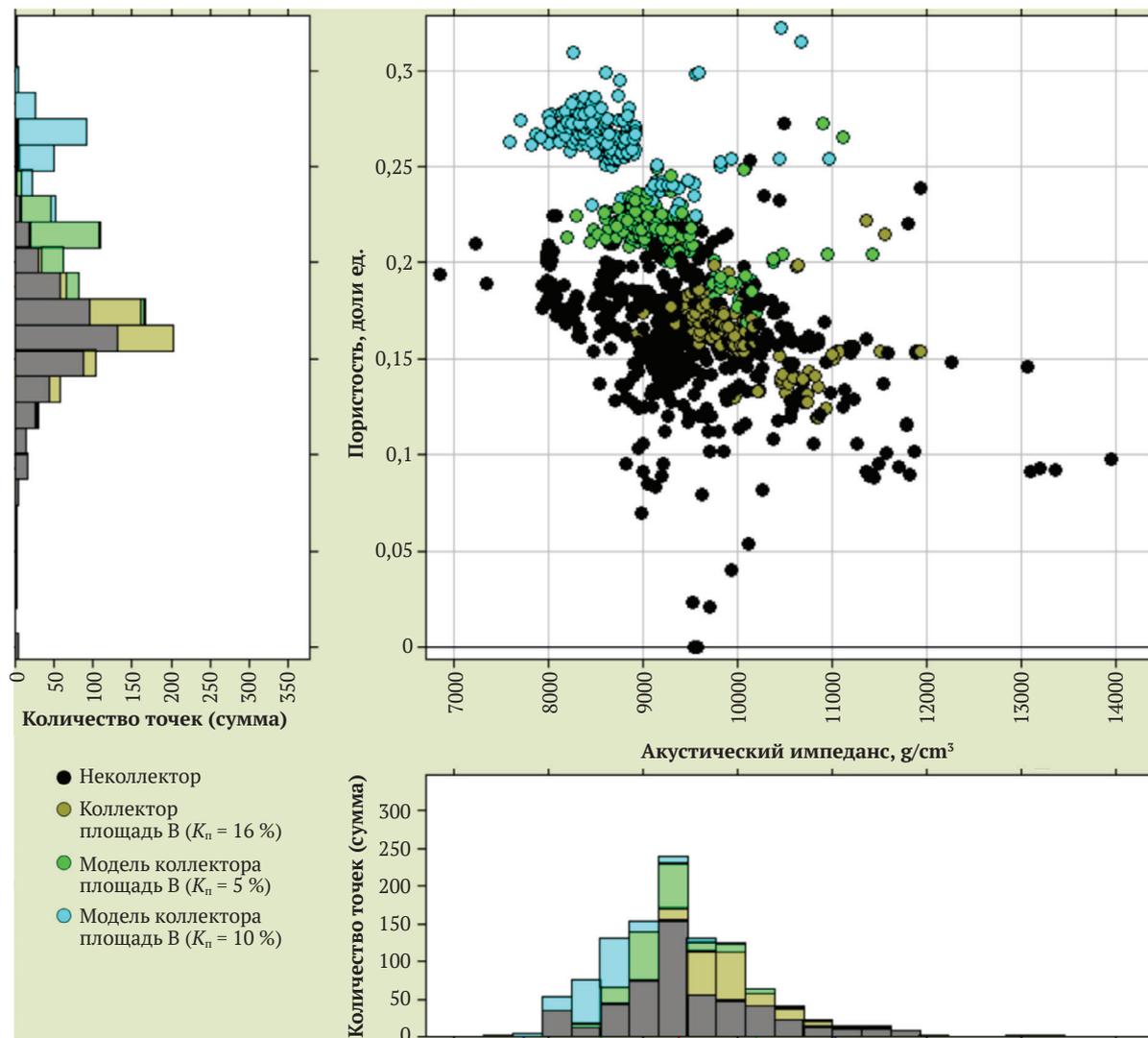


Рис. 4. Результаты петроупругого моделирования на примере верхнепермских терригенных отложений. Промоделированы случаи возможных значений пористости в коллекторе согласно априорной информации с месторождений-аналогов

Пример 3. Способ прогноза подсчетных параметров залежей углеводородов, позволяющий повысить геологическую эффективность картирования эффективных нефтегазонасыщенных толщин и фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) коллекторов

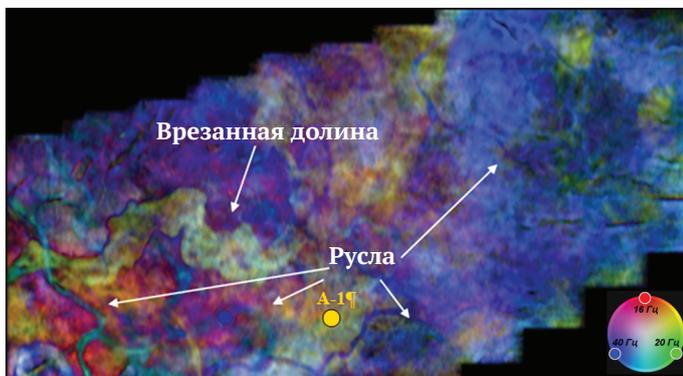
Как правило, для количественного прогноза подсчетных параметров залежей углеводородов строятся карты фильтрационно-емкостных свойств пласта и карты общих и эффективных нефтегазонасыщенных толщин. Карты, построенные с минимальными погрешностями, позволяют специалистам определять оптимальное местоположение скважин в наилучших коллекторах с максимальными эффективными толщинами, минимизируя тем самым риски бурения.

Стандартный алгоритм построения карт описан во многих учебных пособиях, и реализован в мно-

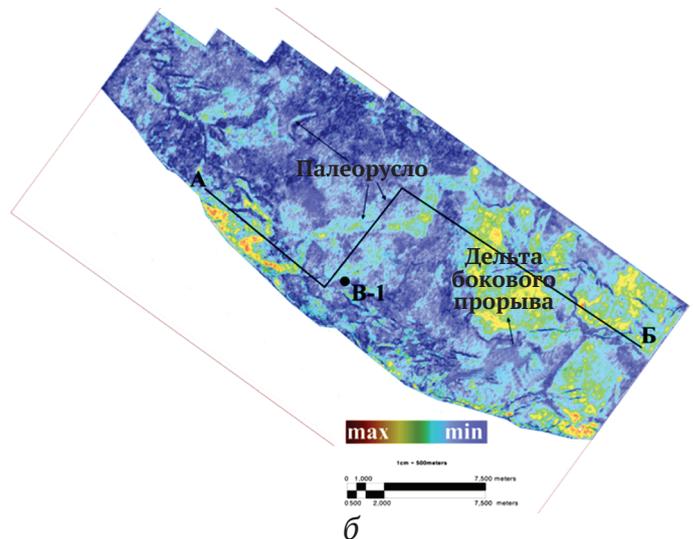
гочисленных программных средствах. Входными данными являются результаты интерпретации геофизических исследований скважин (ГИС), исследований отобранного керна, испытаний и опробований пластов на продуктивность. В межскважинном пространстве положение коллектора, распределение ФЕС и толщины пласта определяются по данным сейсморазведки [11].

Авторы предлагают новый подход к прогнозированию высокодебитных залежей УВ. Анализ как российских, так и зарубежных литературных данных, показал, что именно такой метод пока широко не применяется в нефтегазогеологической и научной среде.

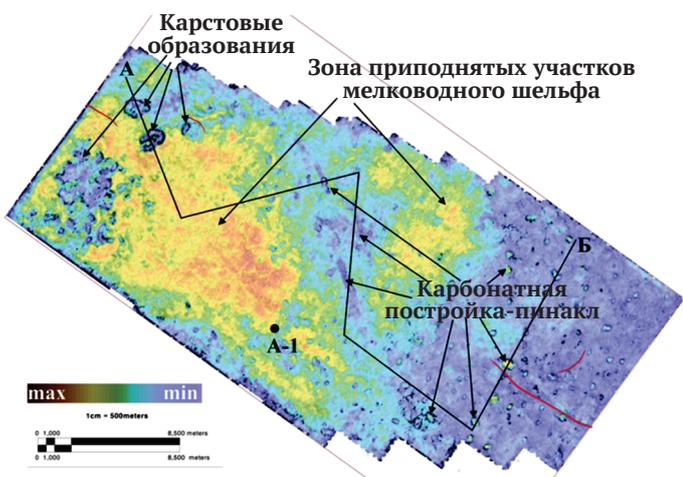
В рамках представляемой методики прогноз параметров залежи УВ проводился с использованием параметров коллекторов: эффективная толщина и произведение эффективной толщины на коэффициент пористости $h_{эф}$, $K_{п} \cdot h_{эф}$, значения общей толщины перспективного пласта ΔH .



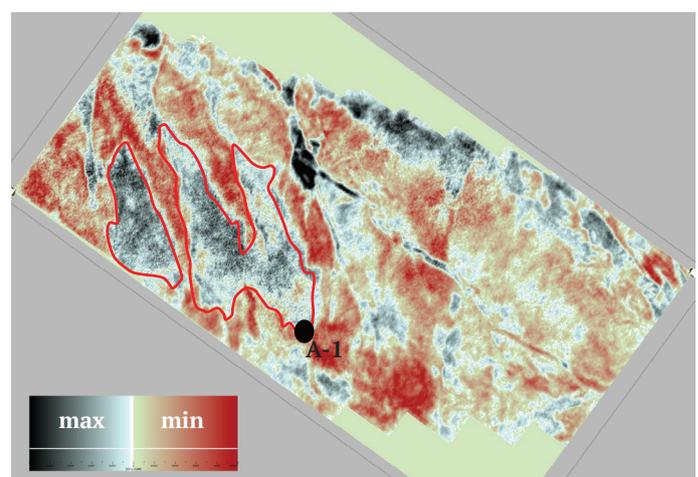
а



б



в



z

Рис. 5. Карта атрибута:

- а – спектральной декомпозиции в интервале кровли верхнепермских отложений (площадь А);
- б – RMS (среднеквадратические амплитуды)-амплитуды в интервале верхнепермского пласта коллектора (площадь В);
- в – комплексного атрибута RMS-амплитуды и когерентности в нижнепермском интервале разреза (площадь А);
- z – горизонтального среза амплитуд в нижнесилурийском интервале разреза (площадь А)

Первоначально по результатам интерпретации данных геофизических исследований скважин определяются значения параметров коллекторов. Далее строятся регрессионные зависимости: $h_{эф}$ от ΔH , $K_{п} \cdot h_{эф}$ от ΔH . В результате получаем уравнение, которое используется для построения карт эффективных толщин и прогнозных карт коллекторов. Тип графика – линейный или полиномиальный – выбирается в зависимости от значения коэффициента корреляции R^2 , определяющего точность построений. При удовлетворительном согласовании входных параметров он должен быть не ниже 0,5. Значение R^2 зависит от качества и количества входной информации (скважины, данные ГИС). Чем выше значение R^2 , тем выше качество построений и прогноза.

Основным критерием выбора точки рекомендуемой скважины на прогнозных картах параметров коллекторов будут являться максимальные значения коэффициентов пористости $K_{п}$ и эффективных нефтегазонасыщенных толщин $h_{эф}$ пластов-коллекторов. Рассмотрим пример.

Ермоловский участок недр расположен в центральной части Ижма-Печорской впадины в пределах Лемъюской ступени в старом добычном районе с развитой инфраструктурой. На площади по материалам пробуренных ранее скважин залежей нефти или газа установлено не было. Однако результаты переинтерпретации старого каротажа, новые данные геофизических исследований скважин по скв. 1-Ермоловская, данные сейсмоки МОГТ-2D послужили основанием для проведения здесь детальных работ, а именно сейсморазведки МОГТ-3D. На основании полученных материалов сейсморазведочных работ МОГТ-3D подготовлены и сданы в бурение две структуры – Седьвовская и Восточно-Седьвовская, выбраны точки заложения скважин.

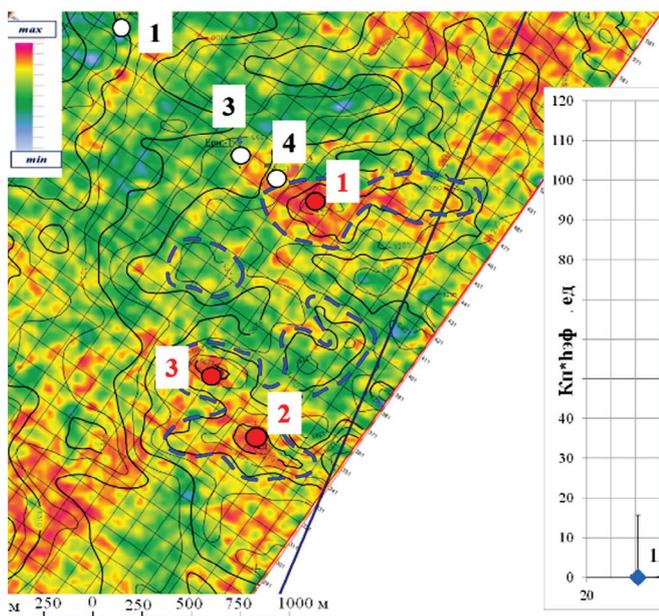
Для определения очередности бурения выполнен количественный прогноз параметров прогнозируемых залежей нефти (рис. 6). На графиках и картах, характеризующих зависимость эффективной нефтенасыщенной толщины $h_{эф}$ и произведений значений эффективной нефтенасыщенной толщины на значения пористости $K_{п} \cdot h_{эф}$ от общей толщины пласта H , точка рекомендуемой скважины 1 занимает наивысшее положение и характеризуется максимальными значениями. Тип графика – полиномиальный. Коэффициент корреляции равен 0,852, что говорит о высокой точности выполненного прогноза.

Выводы. Предложенный авторами способ прогноза параметров залежей УВ позволит определять максимумы эффективных нефтегазонасыщенных толщин в пределах закартированных ловушек.

Максимальные значения коэффициентов пористости $K_{п}$ и эффективных нефтегазонасыщенных толщин $h_{эф}$ пластов-коллекторов в экранируемом объеме – признак высокодебитных залежей углеводородов. Если учесть данный факт – применение предложенных регрессионных зависимостей при прогнозе открытия залежей УВ позволит размещать скважины непосредственно в максимумы значений, повышая эффективность бурения.

К сожалению, к настоящему времени скважины на участке не пробурены. Однако эффективность применения предложенного методического подхода доказана на Северо-Хоседаюском и Северо-Мукеркамьском месторождениях нефти, где были пробурены скважины с дебитом более 100 т/сут и получен продукт в серпуховских карбонатах нижнего карбона и нюмылгско-зеленецких рифогенных отложениях верхнего девона.

Карта $K_{п} \cdot h_{эф}$ с точками рекомендуемых скважин



Зависимость $K_{п} \cdot h_{эф}$ от общей толщины пласта

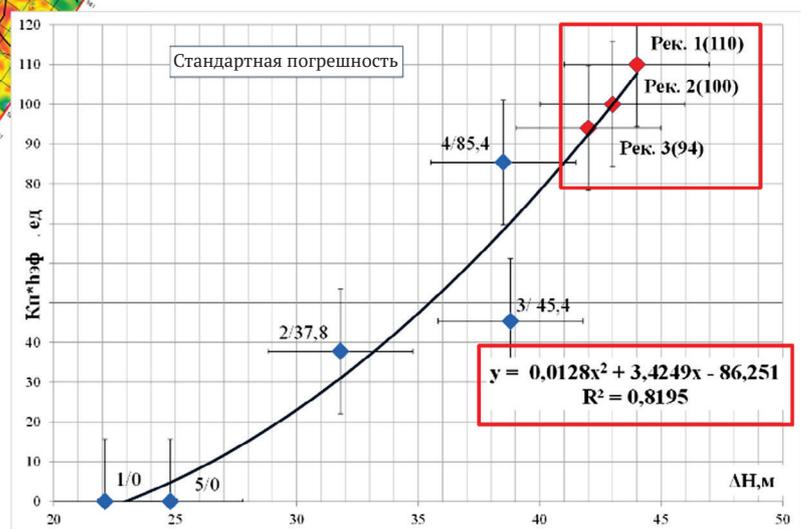


Рис. 6. Пример количественного прогноза ФЕС коллектора. Пласт Ф5 (D3ур). Ермоловская площадь (по материалам Института проблем нефти и газа Российской академии наук (ИПНГ РАН))



Заключение

Предложенный научный подход к историко-генетическому методу для прогноза ловушек и залежей углеводородов позволил наметить три возможные литологически ограниченные ловушки, тем самым увеличив перспективы нефтегазоносности площади, и скорректировать дальнейшую программу геологоразведочных работ.

Результаты динамического анализа, широко используемого в отечественной и зарубежной практике на разбуренных площадях и месторождениях, подтвердили целесообразность его применения на малоизученных бурением или выведенных из бурения структурах и поиска пропущенных залежей.

Значения параметров залежи $h_{эф}$, $K_n \cdot h_{эф}$, определяемые по результатам интерпретации данных геофизических исследований скважин, и их регрессионные зависимости ($h_{эф}$ от ΔH , $K_n \cdot h_{эф}$ от ΔH) являются ключом к построению прогнозных карт эффективных нефтегазонасыщенных толщин и высокочемких кол-

лекторов и их количественному прогнозу. Эти карты позволяют в дальнейшем размещать скважины непосредственно в максимумы значений, повышая эффективность бурения.

Представленные технологии выделения нефтегазоперспективных ловушек и прогноза подсчетных параметров залежей углеводородов позволят специалистам обеспечить кондиционность подготовки поисковых объектов и тем самым повысить качество планирования и эффективность геологоразведочных работ за счет снижения количества бурения непродуктивных скважин. Это повысит точность оценки ресурсов и запасов прогнозируемых и обнаруженных залежей.

Применение представленных методических подходов прогноза и поисков залежей углеводородов может стать весомым дополнением на любом этапе геологоразведочного процесса в пределах Тимано-Печорской нефтегазонасыщенной провинции и в других нефтегазонасыщенных регионах страны.

Список литературы

1. Ростовщиков В.Б., Маракова И.А., Колоколова И.В. Перспективы открытия новых месторождений углеводородов в Тимано-Печорской провинции. В: *Геология и минеральные ресурсы Европейского Северо-Востока России: Материалы XVII Геологического съезда Республики Коми*. Т. III. Сыктывкар: Инст. Геологии Коми НЦ УрО РАН; 2019. С. 142–149. URL: https://geo.komisc.ru/science_results/scientific-publication/proceedingofmeetings/meetings/2019-2/714-xvii-geologicheskij-s-ezd-tom-iii
2. Dolson J., He Zh., Horn B.W. Advances and perspectives on stratigraphic trap exploration – making the subtle trap obvious. *Search and Discovery*. 2018:60054. URL: http://www.searchanddiscovery.com/documents/2018/60054dolson/ndx_dolson.pdf
3. Luthi S. *Petroleum geology. AES/TA 3820*. Delft University of Technology. 2019. URL: https://ocw.tudelft.nl/wp-content/uploads/PGeo_L6_Petroleum_Geology_-_Lecture_6_08.pdf
4. Pearson K. *Geologic models and evaluation of undiscovered conventional and continuous oil and gas resources – Upper Cretaceous Austin Chalk, U.S. Gulf Coast*. Scientific investigations report 2012–5159. Reston, Virginia; 2012. URL: <https://pubs.usgs.gov/sir/2012/5159/SIR12-5159.pdf>
5. Грунис Е.Б., Маракова И.А., Ростовщиков В.Б. Особенности строения, условия формирования пермского терригенного комплекса, этапы образования неантиклинальных ловушек в северо-восточной части Тимано-Печорской провинции. *Геология нефти и газа*. 2017;(1):13–25. URL: https://8ff66ccb-790d-4b70-8dd3-4f77ad779bb5.filesusr.com/ugd/19d8ab_a0fe6e3389724158b59db91f51e2b936.pdf
6. Маракова И.А., Ростовщиков В.Б. Модель формирования дельтовых нижнепермских отложений на внешнем борту Коротайхинской впадины в связи с нефтегазоносностью. В: *Сборник материалов международного семинара «Рассохинские чтения»*. 4–5 февраля 2016 г. В 2 ч. Ч. 1. Под ред. Н. Д. Цхадая. Ухта: УГТУ; 2016. С. 54–59.
7. Анищенко Л.А., Клименко С.С., Рябинкина Н.Н. и др. *Органическая геохимия и нефтегазоносность пермских отложений севера Предуральяского прогиба*. Монография. СПб.: Наука; 2004. 214 с.
8. Прищепка О.М., Баженова Т.К., Богацкий В.И. Нефтегазовые системы Тимано-Печорского осадочного бассейна (включая акваториальную печороморскую часть). *Геология и геофизика*. 2011;52(8):1129–1150. URL: <https://www.sibran.ru/upload/iblock/364/364210d589f86d7b2df9de540a3f9777.pdf>
9. Volkov R.P., Volkov D.S., Kozhevnikov G.S. From qualitative interpretation to quantitative analysis: prediction of properties of geological bodies by using the spectral decomposition attribute – case study of Achimov turbidity system in West-Siberia. In: *the SPE Russian Petroleum Technology Conference*. Virtual, October 2020. SPE-202030-MS. <https://doi.org/10.2118/202030-MS>
10. Partyka G.A., Gridley J., Lopez J. Interpretational applications of spectral decomposition in reservoir characterization. *The Leading Edge*. 1999;18(3):353–360. <https://doi.org/10.1190/1.1438295>
11. Колоколова И.В., Попова М.Н. Новые критерии выделения и прогноза перспективных природных резервуаров углеводородов по данным геофизических методов. *Экспозиция Нефть Газ*. 2020;(5):26–33. <https://doi.org/10.24411/2076-6785-2020-10096>



References

1. Rostovshchikov V.B., Marakova I.A., Kolokolova I.V. Prospects for the discovery of new hydrocarbon accumulations in the Timan-Pechora province. In: *Geology and mineral resources of the European Northeast of Russia: Proceedings of the XVII Geological Congress of the Komi Republic*. Vol. 3. Syktyvkar: Publ. House of Institute of Geology, Komi Scientific Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; 2019. Pp. 142–149. (In Russ.) URL: https://geo.komisc.ru/science_results/scientific-publication/proceedingofmeetings/meetings/2019-2/714-xvii-geologicheskij-s-ezd-tom-iii
2. Dolson J., He Zh., Horn B.W. Advances and perspectives on stratigraphic trap exploration – making the subtle trap obvious. *Search and Discovery*. 2018:60054. URL: http://www.searchanddiscovery.com/documents/2018/60054dolson/ndx_dolson.pdf
3. Luthi S. *Petroleum geology. AES/TA 3820*. Delft University of Technology. 2019. URL: https://ocw.tudelft.nl/wp-content/uploads/PGeo_L6_Petroleum_Geology_Lecture_6_08.pdf
4. Pearson K. *Geologic models and evaluation of undiscovered conventional and continuous oil and gas resources – Upper Cretaceous Austin Chalk, U.S. Gulf Coast*. Scientific investigations report 2012–5159. Reston, Virginia; 2012. URL: <https://pubs.usgs.gov/sir/2012/5159/SIR12-5159.pdf>
5. Grunis E.B., Marakova I.A., Rostovshchikov V.B. Structural features and formation conditions of the permian terrigenous sequence and stages of non-anticlinal trap formation in the northeastern part of the Timan-Pechora province. *Geology of Oil and Gas*. 2017;(1):13–25. (In Russ.) URL: https://8ff66ccb-790d-4b70-8dd3-4f77ad779bb5.filesusr.com/ugd/19d8ab_a0fe6e3389724158b59db91f51e2b936.pdf
6. Marakova I.A., Rostovshchikov V.B. Model of the formation of Lower Permian deltaic sediments on the outer side of the Korotaikhinskaya Depression in connection with oil and gas potential. In: Tskhadaya N.D. (ed.) *Information package of the international seminar “Rassokhinsky Readings”*. February 4–5, 2016. In 2 parts. Part 1. Ukhta: UGTU Publ.; 2016. Pp. 54–59. (In Russ.)
7. Anishchenko L.A., Klimenko S.S., Ryabinkina N.N. et al. *Organic geochemistry and oil and gas potential of Permian sediments in the north of Pre-Urals foredeep*. Monograph. St. Petersburg: Nauka Publ.; 2004. 214 p. (In Russ.)
8. Prishchepa O.M., Bazhenova T.K., Bogatsky V.I. Oil & gas-bearing systems of the Timan-Pechora sedimentary basin (including Pechora sea territorial waters part). *Russian Geology and Geophysics*. 2011;52(8):1129–1150. URL: <https://www.sibran.ru/upload/iblock/364/364210d589f86d7b2df9de540a3f9777.pdf>
9. Volkov R.P., Volkov D.S., Kozhevnikov G.S. From qualitative interpretation to quantitative analysis: prediction of properties of geological bodies by using the spectral decomposition attribute – case study of Achimov turbidity system in West-Siberia. In: *the SPE Russian Petroleum Technology Conference*. Virtual, October 2020. SPE-202030-MS. <https://doi.org/10.2118/202030-MS>
10. Partyka G.A., Gridley J., Lopez J. Interpretational applications of spectral decomposition in reservoir characterization. *The Leading Edge*. 1999;18(3):353–360. <https://doi.org/10.1190/1.1438295>
11. Kolokolova I.V., Popova M.N. New criteria of the extraction and forecast of perspective hydrocarbon natural reservoirs according to the geophysical methods data. *Exposition Oil Gas*. 2020;(5):26–33. (In Russ.) <https://doi.org/10.24411/2076-6785-2020-10096>

Информация об авторах

Наталья Павловна Демченко – кандидат геолого-минералогических наук, доцент, декан нефтегазового факультета, Ухтинский государственный технический университет, г. Ухта, Российская Федерация; Scopus ID [56121636400](https://orcid.org/0000-0001-9142-1000); e-mail ndemchenko@ugtu.net

Владимир Борисович Ростовщик – кандидат геолого-минералогических наук, заведующий кафедрой поиска и разведки месторождений полезных ископаемых, Ухтинский государственный технический университет, г. Ухта, Российская Федерация; ORCID [0000-0003-4683-3975](https://orcid.org/0000-0003-4683-3975), Scopus ID [57224741684](https://orcid.org/0000-0001-9142-1000); e-mail vrstovchikov@ugtu.net

Ирина Владимировна Колоколова – кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник лаборатории ресурсной базы нефтегазового комплекса, Институт проблем нефти и газа Российской академии наук (ИПНГ РАН), г. Москва, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-1576-3858](https://orcid.org/0000-0002-1576-3858), Scopus ID [56121397000](https://orcid.org/0000-0001-9142-1000); e-mail ipngkolokolova@yandex.ru

Инна Андреевна Маракова – кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры поиска и разведки месторождений полезных ископаемых, Ухтинский государственный технический университет, г. Ухта, Российская Федерация; Scopus ID [57217633120](https://orcid.org/0000-0001-9142-1000); e-mail imarakova@ugtu.net

Дмитрий Сергеевич Волков – аспирант кафедры сейсмометрии и геоакустики, геологический факультет, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Российская Федерация; IRID [69897841](https://orcid.org/0000-0001-9142-1000); e-mail dmitrij.volkov-msu@yandex.com



Information about the authors

Natalia P. Demchenko – Cand. Sci. (Geol. and Min.), Associate Professor, Dean of the Faculty of Oil and Gas, Ukhta State Technical University, Ukhta, Russian Federation; Scopus ID [56121636400](#); e-mail ndemchenko@ugtu.net

Vladimir B. Rostovshchikov – Cand. Sci. (Geol. and Min.), Head of the Department of Prospecting and Exploration of Mineral Deposits, Ukhta State Technical University, Ukhta, Russian Federation; ORCID [0000-0003-4683-3975](#), Scopus ID [57224741684](#); e-mail vrostovchikov@ugtu.net

Irina V. Kolokolova – Cand. Sci. (Geol. and Min.), Researcher at the Laboratory of the Resource Base of the Oil and Gas Complex, Oil and Gas Research Institute Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; ORCID [0000-0002-1576-3858](#), Scopus ID [56121397000](#); e-mail ipngkolokolova@yandex.ru

Inna A. Marakova – Cand. Sci. (Geol. and Min.), Associate Professor of the Department of Prospecting and Exploration of Mineral Deposits, Ukhta State Technical University, Ukhta, Russian Federation; Scopus ID [57217633120](#); e-mail imarakova@ugtu.net

Dmitrii S. Volkov – Postgraduate Student, Department of Seismometry and Geoacoustics, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation; IRID [69897841](#); e-mail dmitrij.volkov-msu@yandex.com

Поступила в редакцию 04.04.2022

Поступила после рецензирования 04.10.2022

Принята к публикации 05.10.2022

Received 04.04.2022

Revised 04.10.2022

Accepted 05.10.2022



ОБОГАЩЕНИЕ, ПЕРЕРАБОТКА МИНЕРАЛЬНОГО И ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-10-23>

УДК 622.7

Выбор температурных режимов кондиционирования и флотации алмазосодержащих кимберлитов компаундными собирателямиВ. В. Морозов¹   , Е. Г. Коваленко^{2,3} , Г. П. Двойченкова^{3,4}  , В. А. Чуть-Ды²¹ Университет науки и технологий МИСИС, г. Москва, Российская Федерация² Институт «Якутнипроалмаз», АК «АЛРОСА» (ПАО), г. Мирный, Российская Федерация³ Институт проблем комплексного освоения недр РАН (ИПКОН РАН), г. Москва, Российская Федерация⁴ Мирнинский Политехнический институт – филиал Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова (МПТИ (ф) СВФУ), г. Мирный, Российская Федерация dchmggu@mail.ru**Аннотация**

Условием устойчивого закрепления собирателя на поверхности алмазов и их флотации являются применение собирателей оптимального фракционного состава и выбор необходимого температурного режима технологических операций. С целью определения параметров режима флотации алмазов установлены закономерности фазовых переходов асфальтено-смолистых фракций при повышении температуры и разбавлении мазута Ф-5 дизельной технической фракцией. Показано, что увеличение температуры собирателя приводит к переводу асфальтено-смолистых фракций в растворенное и тонкодисперсное состояние. В еще большей мере решению задачи растворения асфальтено-смолистых фракций способствует добавление средне- и низкомолекулярных фракций нефти, например, дизельной технической фракции.

Показано, что реагенты КМ-10, КМ-14 и КМ-18, представляющие собой компаунды мазута Ф-5 с дизельной технической фракцией (10–18 % ДФ), характеризуются оптимальной вязкостью и способностью вытеснять водную фазу с поверхности алмаза, что обеспечивает возможность устойчивой гидрофобизации и высокую флотирруемость алмаза. Выбран оптимальный температурный режим, который предполагает поддержание температуры в операции кондиционирования с собирателем +30–40 °С, при котором достигается максимальная склонность компаундных собирателей к селективному закреплению на поверхности алмазов, характеризуемая величиной краевого угла смачивания.

Флотационными опытами подтверждено, что наилучшие результаты достигаются при температуре среды +30–40 °С в операции кондиционирования и +14–24 °С при флотации. При +24 °С наилучшие результаты получены для относительно менее разбавленных мазутов КМ-10 и КМ-14, полученных разбавлением мазута Ф-5 дизельной технической фракцией с объемной долей разбавителя 10 и 14 %. Достигнутое извлечение алмазов при флотации на 3,8–4,5 % выше, чем при использовании базового собирателя – мазута Ф-5. При +14 °С лучше проявляет собирательные свойства мазут с большим разбавлением – КМ-18 с объемной долей дизельной технической фракции 18 %.

Оптимальные составы собирателя и режим подготовки питания и флотации апробированы на установке пенной сепарации, где показали возможность повышения извлечения алмазов в концентрат на 2,3–4,5 %. Даны рекомендации по применению теплового кондиционирования в цикле пенной сепарации и поддержанию температуры среды в операции кондиционирования +30–40 °С и в операции пенной сепарации +14–24 °С.

Ключевые слова

алмазы, кимберлиты, собиратель, фракционный состав, кондиционирование, смачивание, пенная сепарация, тепловая обработка

Для цитирования

Morozov V.V., Kovalenko E.G., Dvoichenkova G.P., Chut-Dy V.A. Selection of Temperature regimes for conditioning and flotation of diamond-bearing kimberlite with compound collectors. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2022;7(4):287–297. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-10-23>



BENEFICIATION AND PROCESSING OF NATURAL AND TECHNOGENIC RAW MATERIALS

Research article

Selection of Temperature regimes for conditioning and flotation of diamond-bearing kimberlite with compound collectorsV.V. Morozov¹   , E.G. Kovalenko^{2,3} , G.P. Dvoichenkova^{3,4}  , V. A. Chut-Dy²¹ University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation² Yakutniproalmaz Institute, ALROSA, 6 Lenina st., Mirny, Russian Federation³ Institute for Integrated Subsoil Development of the Russian Academy of Sciences (IPCON RAS), Moscow, Russian Federation⁴ Mirny Polytechnical Institute under the North-Eastern Federal University named after M. K. Ammosov, (MPTI (f) NEFU), Mirny, Russian Federation dchmggu@mail.ru**Abstract**

The condition for stable fixation of a collector on the surface of diamonds and their flotation is the use of collectors of the optimal fractional composition and the choice of the optimum temperature regime of the process. To determine the parameters of the diamond flotation regime, the regularities of the phase transitions of asphaltene-tar fractions at increasing temperature and diluting F-5 with technical diesel fraction were established. It was demonstrated that increasing the collector temperature leads to the transfer of asphaltene-tar fractions to a dissolved and finely dispersed state. To an even greater extent, dissolving asphaltene-tar fractions is facilitated by the addition of medium- and low-molecular weight fractions of oil, for instance, a technical diesel fraction.

It was revealed that the KM-10, KM-14, and KM-18 reagents, being compounds of F-5 fuel oil with technical diesel fraction (10–18 % DF), were characterized by optimal viscosity and ability to displace aqueous phase from a diamond surface, thus ensuring stable hydrophobization and high floatability of diamonds. The optimal temperature regime has been selected, which involved maintaining the temperature at the stage of conditioning with the collector at +30–40 °C, at which the maximum selective fixation of compound collectors on the diamond surface, characterized by the value of the limiting wetting angle, was achieved.

The flotation tests have confirmed that the best results are achieved at a temperature of +30–40 °C at the conditioning stage and +14–24 °C at the flotation stage. At +24 °C, the best results were obtained for the relatively less diluted KM-10 and KM-14 fuel oils obtained by diluting F-5 fuel oil with a technical diesel fraction at the diluent volume fractions of 10 and 14 %. The diamond recovery achieved in the flotation tests was 3.8–4.5 % higher than when using the traditional collector, F-5 fuel oil. At +14 °C, the highly diluted fuel oil, KM-18 with a volume fraction of 18 % of the technical diesel fraction, demonstrated better collecting abilities.

The optimal compositions of the collector and the regimes of feed preparation and flotation were tested at a foam separation unit. The tests showed that it is possible to increase diamond recovery into concentrate by 2.3–4.5 %. The recommendations are provided on the use of thermal conditioning in the foam separation cycle and maintaining the conditioning medium temperature at +30–40 °C and the foam separation temperature at +14–24 °C.

Keywords

diamonds, kimberlite, collector, fractional composition, conditioning, wetting, foam separation, heat treatment

For citation

Morozov V.V., Kovalenko E.G., Dvoichenkova G.P., Chut-Dy V.A. Selection of Temperature regimes for conditioning and flotation of diamond-bearing kimberlite with compound collectors. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2022;7(4):287–297. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-10-23>

Введение

В процессе пенной сепарации, являющейся основным способом извлечения мелких алмазов из кимберлитов, в качестве собирателей используются различные нефтепродукты, включая нефть, мазут флотский Ф5, водонефтяные эмульсии [1, 2]. Изменение фракционного состава применяемых в качестве собирателя нефтепродуктов, колебания температуры флотационной пульпы часто приводят к ухудшению показателей пенной сепарации [3]. Основной причиной снижения извлечения является недостаточно

устойчивое закрепление аполярного собирателя на поверхности алмазов, обусловленное гидрофилизацией поверхности алмазов или неэффективной работой собирателей [3, 4]. Повышение устойчивости закрепления собирателя на поверхности алмазов и в итоге повышение их флотируемости может быть обеспечено применением методов восстановления природной флотируемости алмазов, выбором собирателей оптимального фракционного состава и поддержанием необходимого температурного режима операций кондиционирования и пенной сепарации [5–7].



Для решения задачи повышения эффективности пенной сепарации алмазосодержащих кимберлитов в настоящей работе исследовались физико-химические свойства и определялся оптимальный компонентный состав собирателей, а также выбирался температурный режим основных операций технологического процесса.

1. Методики исследований

Исследование структуры применяемых в качестве собирателя нефтепродуктов осуществляли методом комбинированной оптической микроскопии в ультрафиолетовом и видимом диапазоне света [8]. Снимки тонкого слоя нефтепродуктов получали на микроскопе Микромед-3-ЛЮМ. Визиометрический анализ и построение гранулометрических характеристик зерен асфальтено-смолистых фракций проводились с использованием программного пакета ВидеоТест 4.0 [9].

Для измерения вязкости реагентов применялся вибрационный вискозиметр SV-10 [10]. Важным преимуществом применяемых метода и прибора является возможность получения непрерывных зависимостей вязкости от температуры как в режиме остывания, так и в режиме нагревания пробы.

Для измерений краевого угла смачивания алмазов и кимберлита каплей собирателя в водной среде использовали прибор ОСА 15ЕС с USB-камерой и системой прямой дозировки жидкости SD-DM в комбинации с электронным дозирующим модулем ES [11]. При проведении исследований использовалась усовершенствованная методика измерений, описанная в соответствующем разделе статьи.

Для проверки собирательных свойств исследуемых нефтепродуктов и их смесей использовалась установка беспенной флотации – трубка Халлимонда с аэратором в виде пористого стекла (фильтра Шотта) [12]. Подготовка алмазов для экспериментальных исследований предполагала химическую очистку их поверхности, которая включала отмывку в четыреххлористом углероде, спирте, дистиллированной воде и обработку в концентрированном растворе соляной кислоты. Применялись индивидуальные минеральные пробы и смеси зерен алмазов и кимберлита отличающейся крупности. Полупромышленные тесты на наилучших собирателях в выбранных температурных режимах проводились на установке пенной сепарации ЛФМ-001С в институте «Якутнипроалмаз» с использованием промышленной оборотной воды. Конкретные условия экспериментов приведены в соответствующих разделах статьи.

2. Исследование влияния температуры и фракционного состава на структуру и вязкость нефтепродуктов

Температура среды в операциях кондиционирования исходного питания с флотационными реагентами и непосредственно в технологическом процессе является важным параметром режима пенной сепарации [7, 13]. Также важным фактором, определяющим показатели флотации алмазов, является структура применяемого собирателя, в частности, форма нахож-

дения адгезионно-активных высокомолекулярных фракций [14, 15]. Структура нефтепродуктов в наибольшей мере определяется соотношением низко- и высокомолекулярных фракций и температурой среды. Для обоснования оптимального температурного режима процессов кондиционирования и флотации алмазосодержащих продуктов были выполнены исследования по определению влияния температуры на структуру применяемого нефтепродукта на примере основного применяемого собирателя – мазута флотского Ф-5. При проведении исследований был изучен диапазон температур от $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$, что обусловлено особенностями режима хранения и применения собирателя.

Для проведения физико-химических и технологических исследований были отобраны пробы мазута флотского Ф-5 и дизельной технической фракции. Предприятием ООО «Бологоенепроодукт» по методике, разработанной ИПКОН РАН, из промышленных продуктов были приготовлены компаундные собиратели, состоящие из мазута Ф-5 и дизельной технической фракции. Определение массовой доли асфальтено-смолистых фракций в исходном мазуте Ф-5 проводили с использованием стандартной методики по ГОСТ 2177-99 (ИСО 3405-88).

Анализ результатов исследований структуры собирателя показал, что при охлаждении мазута Ф-5 до температуры $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ в нем выкристаллизовываются зерна асфальтено-смолистой фракции, кристаллы парафинов и конденсируются капли низкомолекулярных фракций нефти (рис. 1, а). При нагревании мазута флотского до температуры $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$ за счет взаимного растворения фаз исчезают капли низкомолекулярных фракций, а кристаллы асфальтенов и парафинов сохраняются в меньшем количестве (рис. 1, б). При нагреве до $+24\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 1, в) оптически различаемые образования парафинов практически исчезают. При дальнейшем нагреве до $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ парафиновые образования не обнаруживаются и уменьшается количество смол и асфальтенов (рис. 1, г).

Результаты оптико-визиометрического анализа гранулометрического состава зерен асфальтено-смолистой фракции, представленные в виде зависимостей массовой доли вещества в твердом и растворенном фазовом состоянии от температуры, показали закономерность их диспергирования и растворения при повышении температуры. Как видно из рис. 2, массовая доля зерен асфальтено-смолистой фракции оптически различимой крупности ($+0,1\text{ мкм}$) снижается с 28,1 % при температуре $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ до 20,2 % при температуре $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Анализ гранулометрических характеристик зерен асфальтено-смолистой фракции в интервале $0,1\text{--}10\text{ мкм}$ показывает, что нагрев реагента ведет к пропорциональному растворению как крупных, так и мелких зерен, вследствие чего гранулометрическая характеристика фракции меняется незначительно.

Таким образом, полученные результаты показывают, что повышение температуры способствует растворению фракции смол и асфальтенов. Для максимального растворения асфальтенов в низкомолекулярных фракциях необходим подогрев до $+40\text{--}50\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Изменение структуры нефтепродуктов при добавлении низкомолекулярных углеводородных фракций нефти, например, дизельной технической фракции, является хорошо известным способом регулирования их физико-химических свойств [2, 16]. При использовании мазутов в качестве собирателей применение добавок дизельной технической фракции или ее аналогов (дизельного топлива, судового топлива, бытового светлого топлива) обеспечивает не только необходимые свойства, например, уменьшение температуры застывания, но и повы-

шает его собирательные свойства по отношению к алмазам [17].

Разбавление мазутов низкомолекулярными фракциями нефтепереработки вызывает существенное снижение вязкости, температуры застывания и вспышки. Причиной изменения физико-химических свойств нефтепродуктов при изменении их фазового состава являются процессы изменения дисперсной структуры нефти, включая фазовое состояние высокомолекулярных компонентов, в первую очередь асфальтено-смолистой фракции [18].

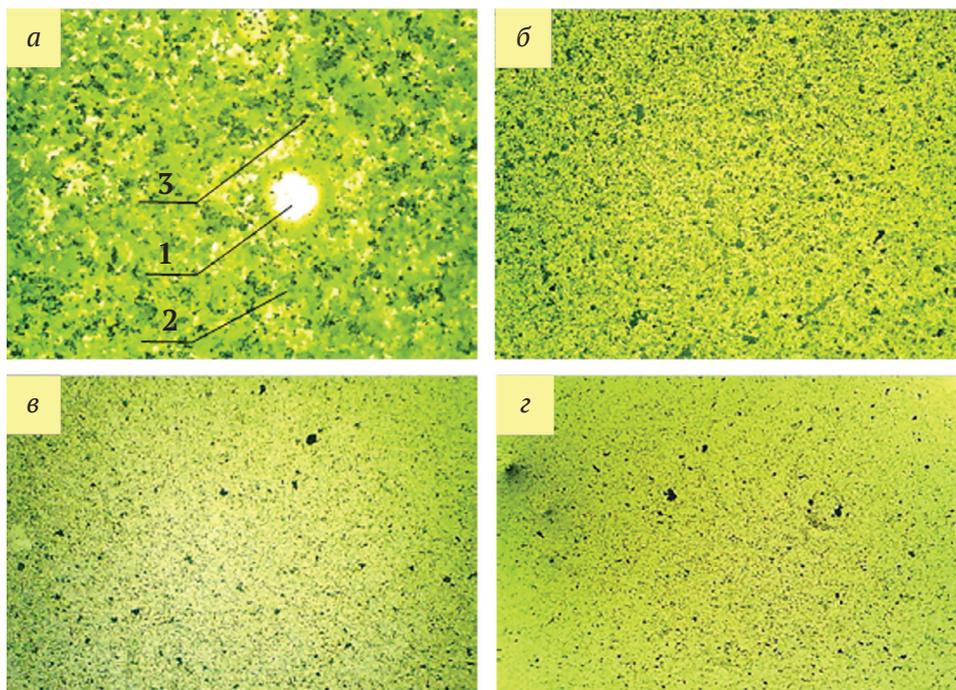


Рис. 1. Снимки тонкого слоя мазута Ф-5 в режиме комбинированного освещения на микроскопе Микромед-3-ЛЮМ после охлаждения до температуры $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ (а), подогрева до температуры $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$ (б), $+24\text{ }^{\circ}\text{C}$ (в) и $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (г):
1 – капли низкомолекулярных фракций; 2 – кристаллы насыщенных углеводородов (парафинов);
3 – зерна асфальтено-смолистых фракций

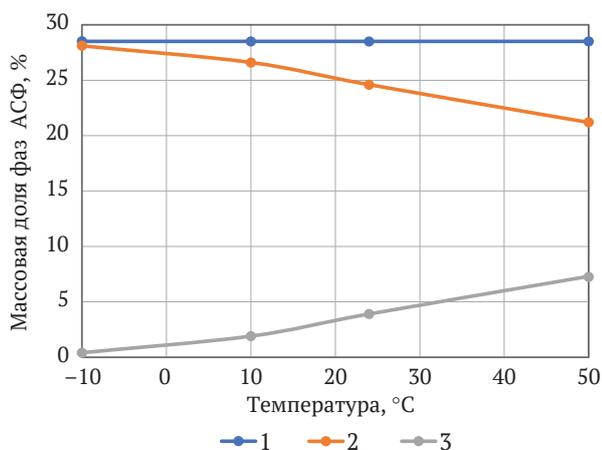


Рис. 2. Изменение доли фаз асфальтено-смолистых фракций (АСФ) при изменении температуры среды:
1 – общая; 2 – в твердой форме по результатам визиометрического анализа;
3 – в растворенной и эмульсионной форме (как разность первых двух значений)

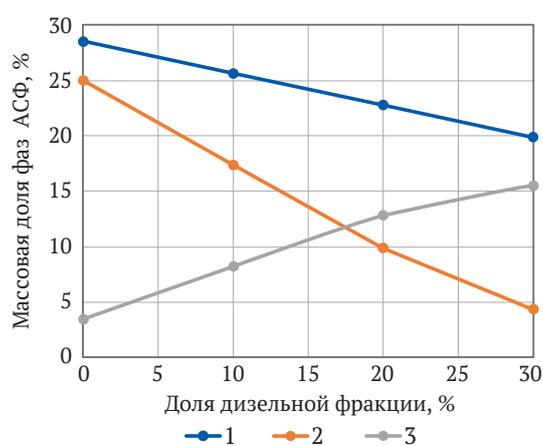


Рис. 3. Изменение доли фаз асфальтено-смолистых фракций (АСФ) при разбавлении мазута Ф-5 дизельной фракцией:
1 – общая; 2 – в твердой форме по результатам визиометрического анализа; 3 – в растворенной и эмульсионной форме

Результаты визиометрического анализа фазового состава фракции асфальтенов и смол, представленные в виде зависимостей доли типов асфальтено-смолистых фракций при разбавлении мазута Ф-5 дизельной фракцией, показали существенное влияние добавок низкомолекулярных углеводородов на структуру нефтепродукта. Результаты оптико-визиометрического анализа показывают, что доля асфальтено-смолистых фракций с размером более 0,1 мкм (фиксируемого при используемой методике) при разбавлении до 30 % дизельной фракцией уменьшается с 25 до 4,5 %. С учетом естественного уменьшения массовой доли фракции смол и асфальтенов при разбавлении их доля в тонкодисперсной, коллоидной и растворенной форме увеличивается с 3,7 до 15,7 абсолютных или с 13,0 до 55,1 относительных процентов (рис. 3).

Анализ полученных результатов показывает, что разбавление мазутов низкомолекулярными фракциями является наиболее действенным фактором в отношении растворения фракции смол и асфальтенов.

Другой характеристикой нефтепродуктов, от которой существенно зависит эффективность взаимодействия собирателя с алмазом, является вязкость. Как показано в работе [2], наилучшие результаты пенной сепарации алмазосодержащих кимберлитов достигаются при использовании компаундов мазута с дизельным топливом или водонефтяными эмульсиями в интервале вязкости 12–19 мПа·с (для стандартной температуры измерения +50 °С).

Вязкость мазутов существенно зависит от температуры и их фракционного состава. Как видно из данных табл. 1, снижение температуры мазута от +50 до +14 °С приводит к увеличению вязкости в несколько раз. Проведенными исследованиями на приборе SV-10 было показано, что при стандартной температуре +50 °С вязкость применяемых в качестве собирателей нефтепродуктов изменяется от 12,3 до 119 мПа·с. При обычной для процесса пенной сепарации температуре +14 °С вязкость возрастает в несколько раз и изменяется в интервале 32,2–1100 мПа·с. При снижении температуры до +10 °С прямогонный мазут и мазут М-40 застывают. Мазут Ф-5 достигает вязкости более 1000 мПа·с.

Анализ данных табл. 1 показывает, что фабричные мазуты обладают более высокой вязкостью (32,5–119 мПа·с), чем было рекомендовано в работе [14]. Приемлемыми характеристиками обладает компаунд мазута Ф-5 с 10% дизельной фракции (вязкость 12,3 мПа·с, табл. 1). Варьирование степени разбавления мазутов низкомолекулярными нефтепродуктами позволяет достичь различных значений вязкости, лежащих в пределах рекомендованного диапазона от 12,3 до 119 мПа·с.

Таким образом, результаты исследований показали, что изменение температуры и разбавление низкомолекулярными фракциями являются действенными факторами регулирования структуры асфальтено-смолистых фракций мазута и его физико-химических свойств.

Таблица 1

Вязкость нефтепродуктов при различных температурах

Продукт	Температура, °С			
	+50	+25	+14	+10
Мазут прямогонный	119,0	155,0	1100	Застыв.
Мазут М-40	72,0	119,0	158,5	Застыв.
Мазут Ф-5	32,5	64,5	119,6	1090
Мазут Ф-5 + 10% ДФ	12,3	17,5	32,2	45,2
Дизельная фракция	0,98	1,64	3,6	5,8

3. Исследование влияния температуры на взаимодействие алмазов и минералов с реагентом-собирателем

Наиболее информативным, оценивающим способность реагентов закрепляться на поверхности минералов, является метод измерения трехфазных краевых углов смачивания. Для системы минерал – капля собирателя – водная фаза (рис. 4) измеряемый краевой (трехфазный) угол смачивания определяется соотношением олеофильности (увеличение угла смачивания) и гидрофильности (снижение краевого угла) поверхности минерала [18].

Для адекватного воспроизведения реальных условий технологического процесса был применен усовершенствованный метод эксперимента, который включал предварительное смачивание минерального образца тонким слоем воды, нанесение на смоченную поверхность капли собирателя и увеличение уровня жидкости выше поверхности образца. В таких условиях имитируется как процесс закрепления собирателя на минерале в процессе кондиционирования (рис. 5, а), так и его отрыв при действии внешних факторов (влияния разности плотности собирателя и водной фазы или гидродинамического отрыва). Распределение собирателя между поверхностью образца и поверхностью водной фазы (части собирателя, всплывшие в силу разности удельных весов воды и собирателя, рис. 5, б), приводит к сохранению на гидрофобном образце капель собирателя с формированием равновесного краевого угла смачивания или полному отрыву капли собирателя с гидрофильного минерала.

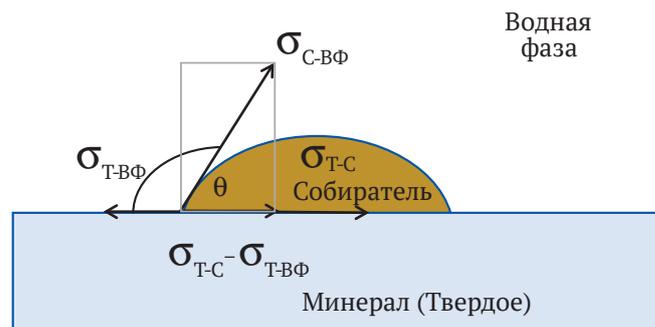


Рис. 4. Схематическое изображение капли собирателя на минерале в кювете, заполненной водной фазой

При обработке кимберлита, являющегося полиминеральным образованием, наблюдается фрагментарное закрепление собирателя на природно-гидрофобных минералах – составляющих кимберлита.

Перед проведением измерений исходный образец (алмаз или кимберлит) замачивался в оборотной воде в контакте с воздухом на один час, после чего проводились охлаждение или нагрев кюветы с минеральным образцом в условиях термостатирования до +10–70 °С, чем обеспечивалось поддержание образца и проведение экспериментов по измерению краевых углов смачивания в диапазоне температур +14–60 °С.

Состав оборотной воды соответствовал оборотной воде ОФ №3 Мирнинского ГОКа. В качестве собирателя применяли мазут Ф-5. Результаты исследований показали слабовыраженную зависимость краевого угла смачивания от температуры водной среды. Краевой угол смачивания, характеризующий гидрофобность алмаза и его склонность к взаимодействию с собирателем, плавно возрастает в интервале температур +14–40 °С. Разность краевых углов при температуре +14 и +40 °С составила 3–5 град (табл. 2). Дальнейшее увеличение температуры не приводит к росту краевого угла смачивания.

Гидрофобные минералы кимберлита (флогопит, тальк и др.), как и алмаз, слабо увеличивают гидрофобность с повышением температуры. На гидрофильные минералы кимберлита (оливин, кальцит) повышение температуры действует положительно, уменьшая их гидрофобность вплоть до прекращения удерживания капли на поверхности минерала при температуре +30 °С и более (табл. 2). На поверхности шлифа кимберлита в большинстве случаев происходит отрыв капли, и мазут закрепляется лишь на отдельных участках поверхности, которые представлены включениями природно-гидрофобных минералов преимущественно слоистых алюмосиликатов. Имеет место полный отрыв капли от поверхности минерала при меньших (+14–30 °С) и максимальных (+60 °С) температурах.

Анализ полученных результатов дает основания предположить, что оптимальный температурный режим операции кондиционирования с собирателем предполагает поддержание температуры в операции кондиционирования +30–40 °С, когда достигается максимальная склонность собирателя к закреплению на поверхности алмаза (отождествляемая с максимальным краевым углом смачивания) и не происходит существенного роста склонности собирателя к закреплению на минералах кимберлита.

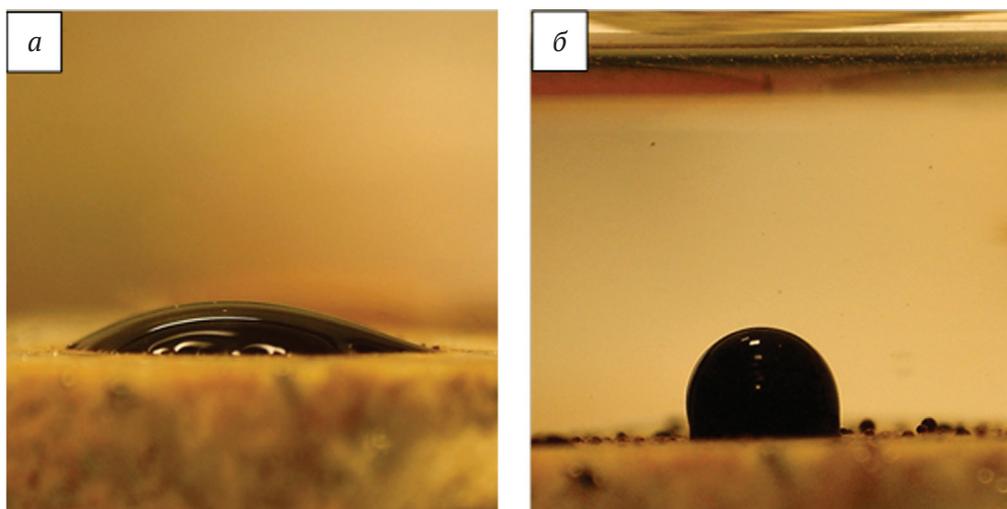


Рис. 5. Изображения капли мазута Ф-5 на поверхности флогопита: а – на смоченном шлифе; б – после подъема уровня воды

Таблица 2

Изменение краевых углов смачивания алмаза и минералов кимберлита каплями мазута Ф-5 при увеличении температуры

Температура среды, °С	Краевой угол смачивания на минералах, град				
	Алмаз	Флогопит	Кимберлит	Кальцит	Оливин
+14	91–95	52–67	Отрыв	42–53	45–55
+24	92–97	54–68	Отрыв	40–50	40–55
+30	94–101	55–65	Отрыв	Отрыв	Отрыв
+40	94–100	57–66	Фрагментарно, 45–75	Отрыв	Отрыв
+50	91–96	58–68	Фрагментарно, 40–75	Отрыв	Отрыв
+60	90–93	60–70	Отрыв	Отрыв	Отрыв



4. Исследование влияния температуры в технологических операциях на флотацию алмазов из кимберлитов

Изменение флотуемости алмазов при варьировании температуры кондиционирования с реагентом-собирателем изучалось по результатам флотационных опытов на трубке Халлимонда при температуре кондиционирования и флотации +10, +14 и +24 °С. Выбранный интервал температур соответствует условиям пенной сепарации на промышленных предприятиях в различное время года. При проведении исследований использовали мазут флотский Ф-5 производства ООО «Бологоеннефтепродукт» и его компаунды с дизельной технической фракцией.

С учетом результатов проведенных исследований для операции кондиционирования исходного питания с собирателем была выбрана температура +30 °С. Требуемая температура в процессе флотации (+10–24 °С) достигалась путем добавления водной фазы с температурой +6–24 °С. Анализ результатов опытов показал, что максимальное извлечение алмазов в концентрат достигается при температурах +14 и +24 °С. При +14 °С наилучшие результаты получены для разбавленных мазутов КМ-10 и КМ-14, полученных разбавлением мазута Ф-5 дизельной фракцией с объемной долей дизельной фракции 10 и 14 % (извлечение 78,4 и 77,9 % соответственно), что на 3,8–4,5 % выше, чем у наилучшего базового собирателя – мазута Ф-5 (табл. 3).

Таблица 3

Извлечение алмазов при флотации с использованием в качестве собирателей мазута флотского Ф-5 и его компаундов с дизельной фракцией (ДФ) при различной температуре

№	Собиратель	Извлечение алмазов в концентрат, %, при флотации при температуре, °С		
		+10	+14	+24
1	Мазут флотский Ф-5	70,6	74,6	80,5
2	Разбавленный мазут КМ-10 (10 % ДФ)	75,4	78,4	84,2
3	Разбавленный мазут КМ-14 (14 % ДФ)	74,3	77,9	83,2
4	Разбавленный мазут КМ-18 (18 % ДФ)	72,0	75,3	81,5

Дальнейшие исследования проводились на установке беспенной флотации на смесях минералов. Использовали навеску кимберлита (200 мг), в которую подгружали алмазы (50 мг). Применяемые классы крупности кимберлита (0,5–0,75 мм) и алмазов (от 0,25 до 0,5 мм) обеспечивали возможность разбора продуктов флотации методом отсева и расчет баланса алмазов и кимберлита.

Методика эксперимента включала операции кондиционирования навески кимберлита и алмазов при фиксированных температурах (+24–40 °С). После кондиционирования добавлялась водная фаза с температурой +12–28 °С. После смешивания устанавливалась

температура среды +14–28 °С, при которой проводился процесс флотации. Результаты флотационных опытов на смесях алмазов и кимберлита при использовании подогрева в операции кондиционирования показали следующее. При использовании мазута Ф-5 максимальное увеличение извлечения алмазов в концентрат достигается при подогреве питания флотации в операции кондиционирования с собирателем до +40 °С и проведении флотации при +28 °С (опыт 3, табл. 4). Заметного изменения извлечения кимберлита в концентрат при варьировании собирателя и температурного режима флотации не наблюдалось.

Для компаундированных мазутов КМ-10, КМ-14 зависимость извлечения алмазов от температуры носит схожий характер и характеризуется максимальным извлечением алмазов при температурном режиме +30/24 и +40/28 °С (температура в операции кондиционирования/флотации). Характерно, что при использовании данных компаундных собирателей извлечение алмазов на(в) 2,5–3,35 выше, чем при применении мазута Ф-5. Такие результаты совпадают с данными исследований, показавших, что в данном диапазоне температур достигаются рациональная вязкость реагентов и максимальный краевой угол смачивания капель собирателя поверхности алмаза. При меньших температурах (режим +24/14 °С) из рассмотренных собирателей наиболее эффективно применение наиболее разбавленного собирателя КМ-18 (опыты 4, 7, 10, табл. 4).

Применяемые схемы водооборота на обогатительных фабриках АК «Алроса» не предполагают применения теплового кондиционирования оборотной воды. Поэтому выбранные реагенты-собиратели были проверены в близком к стандартному режиме подготовки питания: при температуре кондиционирования питания +24 °С и при проведении процесса пенной сепарации +16–18 °С.

Таблица 4

Основные технологические показатели пенной сепарации с применением оптимальных режимов подогрева в операции кондиционирования

№	Применяемый собиратель	Температура при кондиционировании/флотации, °С	Извлечение алмазов в концентрат, %	Выход кимберлита в концентрат, %
1	Мазут Ф-5	24/14	74,5	1,5
2	Мазут Ф-5	30/24	77,8	1,5
3	Мазут Ф-5	40/28	80,3	1,7
4	КМ-10	24/14	77,0	1,9
5	КМ-10	30/24	81,2	1,6
6	КМ-10	40/28	83,2	1,5
7	КМ-14	24/14	77,8	1,7
8	КМ-14	30/24	82,2	1,5
9	КМ-14	40/28	83,6	1,8
10	КМ-18	24/14	80,5	1,3
11	КМ-18	30/24	81,2	1,4
12	КМ-18	40/28	81,2	1,5

Испытания проводились на автоматизированной установке пенной сепарации института «Якутнипроалмаз», оснащенной системой циркуляции оборотной воды и автоматическим дозатором воздуха (рис. 6).

Установка пенной сепарации ЛФМ-001С (см. рис. 6) работала в близком к промышленному режиме (расход собирателя – 1000 г/т, расход бутилового аэрофлота – 50 г/т, расход вспенивателя – 150 г/т). Сепаратор работал на оборотной минерализованной воде хвостохранилища обогатительной фабрики №3 Мирнинского ГОКа при скорости ее подачи в подпенный слой 50 мл/мин и расходе воздуха 100 мл/мин. Добавление вспенивателя осуществлялось перед опытом непосредственно в оборотную воду установки пенной сепарации.

При проведении испытаний осуществляли регулирование температуры смеси кимберлита с алмазами и оборотной воды. Температура в режиме обработки реагентами собирателями составляла +24–30 °С, непосредственно в процессе пенной сепарации – +16–24 °С.

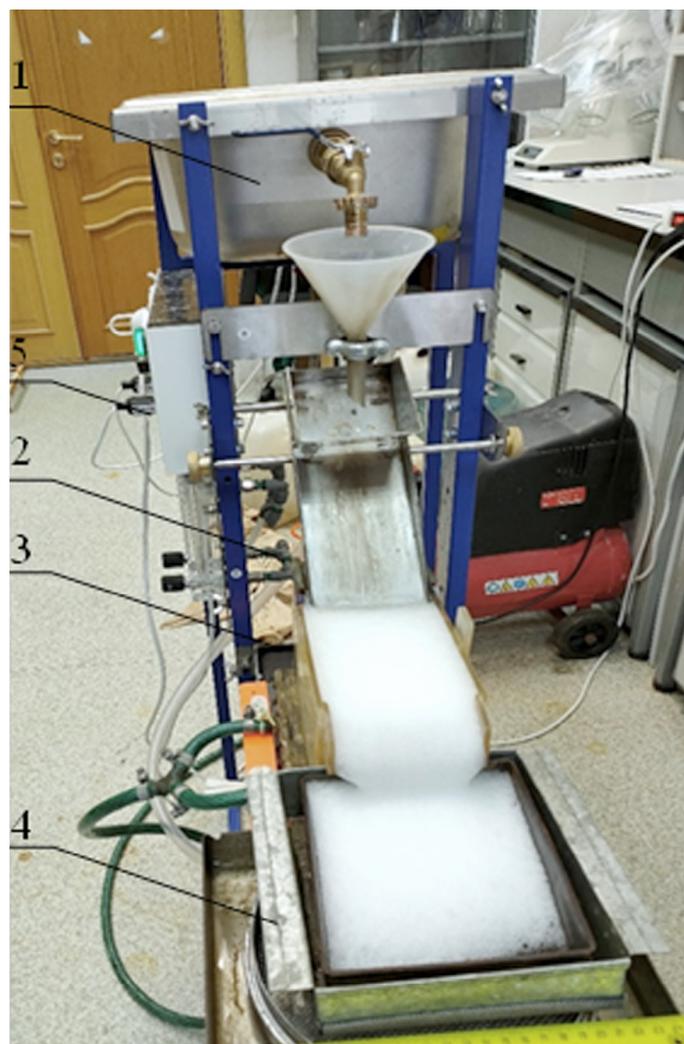


Рис. 6. Автоматизированная установка пенной сепарации:

- 1 – емкость с оборотной водой;
- 2 – питающий лоток;
- 3 – рабочая камера;
- 4 – приемник концентрата;
- 5 – блок управления расходом воздуха

После процесса пенной сепарации проводили разборку продуктов и взвешивание извлеченных алмазов. В качестве критерия эффективности использовался показатель селективности S , рассчитываемый как функция извлечения алмазов ε и выхода кимберлита в концентрат γ :

$$S = \varepsilon - 1,3\gamma. \quad (1)$$

Значение коэффициента 1,3 в уравнении (1) обусловлено соотношением стоимости дополнительно извлекаемых алмазов и затрат на доводку при увеличении выхода кимберлита.

Результаты испытаний на стендовой установке (табл. 5) показали возможность повышения извлечения алмазов в концентрат максимально на 2,3–4,5 % при применении собирателей КМ-10 и КМ-14 при температурном режиме (+30/18 °С).

Таблица 5

Основные показатели процесса пенной сепарации на стендовой установке

№	Реагент	Извлечение алмазов в концентрат, %	Выход кимберлита в концентрат, %	Селективность, %
1	Мазут Ф-5	79,4	1,7	77,19
2	КМ-10	81,7	1,9	79,23
3	КМ-14	83,9	2,9	80,13
4	КМ-18	80,0	2,4	76,80

При увеличении температуры в операции пенной сепарации более +24 °С наблюдается увеличение извлечения алмазов на 1,0–1,3 %. Однако при этом наблюдаются рост выхода кимберлита в концентрат на 1,5–1,8 % и снижение селективности процесса. Поэтому повышение интенсивности теплового кондиционирования требует корректировки реагентного режима пенной сепарации с целью предотвращения повышенного выхода кимберлита в алмазный концентрат.

На основании полученных результатов исследований влияния температуры на показатели пенной сепарации даны рекомендации по применению теплового кондиционирования в цикле пенной сепарации и поддержанию температуры среды кондиционирования +30–40 °С и в операции пенной сепарации +14–24 °С.

Выводы

Установлена закономерность диспергирования и растворения асфальтено-смолистых фракций при повышении температуры среды и разбавлении мазута Ф-5 дизельной фракцией, приводящих к изменениям фазового состава собирателя.

Показано, что компаунды мазута Ф-5 с дизельной фракцией (10–18 % ДФ) обладают необходимыми физико-химическими характеристиками (вязкостью и склонностью к смачиванию поверхности алмаза), обеспечивающими устойчивое закрепление собирателя на поверхности алмаза. Измерения краевого угла смачивания показали, что при поддержании темпе-



ратуры в операции кондиционирования +30–40 °С достигается максимальная склонность собирателя к адгезии к поверхности алмаза и не происходит существенного закрепления изученных собирателей на минералах кимберлита.

Флотационные опыты показали, что наилучшие результаты достигаются при температуре +14 и +24 °С. При +14 °С лучше проявляет собирательные свойства мазут с наибольшим разбавлением КМ-18 с объемной долей дизельной фракции 18 %. При +24 °С наилучшие результаты получены для разбавленных мазутов

КМ-10 и КМ-14, получаемых разбавлением мазута Ф-5 дизельной фракцией с объемной долей дизельной фракции 10 и 14 %. Достигнутое извлечение алмазов (78,4 и 77,9 % соответственно) на 3,8–4,5 % выше, чем при использовании базового собирателя – мазута Ф-5.

Оптимальные составы собирателя и температурный режим подготовки питания и флотации апробированы на установке пенной сепарации, где показали возможность повышения извлечения алмазов в концентрат на 2,3–4,5 %, и рекомендованы к применению в цикле пенной сепарации.

Список литературы

1. Chanturiya V. A. Innovation-based processes of integrated and high-level processing of natural and technogenic minerals in Russia. In: *Proceedings of 29th International Mineral Processing Congress*. September 17–21, 2018, Moscow. Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum; 2019. Pp. 3–12.
2. Махрачев А. Ф., Двойченкова Г. П., Лезова С. П. Исследование и оптимизация состава компаундных собирателей для пенной сепарации алмазов. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2018;(11):178–185. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-11-0-178-185>
3. Верхотурова В. А., Елшин И. В., Немаров А. А. и др. Научное обоснование и выбор оптимального варианта по восстановлению гидрофобных свойств поверхности алмазов из руды трубки «Интернациональная». *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2014;(8):51–56. URL: http://journals.istu.edu/vestnik_irtu/journals/2014/08
4. Злобин М. Н. Технология крупнозернистой флотации при обогащении алмазосодержащих руд. *Горный журнал*. 2011;(1):87–89.
5. Двойченкова Г. П., Морозов В. В., Чантурия Е. Л., Коваленко Е. Г. Выбор параметров электрохимического кондиционирования оборотной воды при подготовке алмазосодержащих кимберлитов к пенной сепарации. *Горные науки и технологии*. 2021;6(3):170–180. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-3-170-180>
6. Морозов В. В., Лезова С. П. Применение комбинированных собирателей на основе нефтепродуктов для пенной сепарации алмазосодержащих кимберлитов. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2020;(12):137–146. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-12-0-137-146>
7. Коваленко Е. Г. Выбор и оптимизация температурного режима процесса пенной сепарации кимберлитов. В: *Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья. Материалы XXVI Национальной научно-технической конференции, проводимой в рамках XIX Уральской горнопромышленной декады*. 26–27 мая 2021 г., Екатеринбург. Екатеринбург: Уральский государственный горный университет; 2021. С. 63–68.
8. Алексеенко В. В., Воронов Д. В., Каташевцев М. Д., Пахомовский А. Н. Исследование гранулометрического состава эмульсий с помощью оптического микроскопа и методом автоматизированного распознавания объектов на цифровой фотографии. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2015;(2):99–104.
9. Бахметьев В. В., Сычев М. М. *Исследование микроструктуры сплавов с использованием компьютерной программы «ВИДЕОТЕСТ»*. СПб.: СПбГТИ(ТУ); 2011. 17 с. URL: <http://tom.technolog.edu.ru/files/vidtest.pdf>
10. Опыт измерения вязкости нефтепродуктов с помощью синусоидального вибровискозиметра SV-10 A&D Company, Ltd (Япония). *Экспозиция Нефть Газ*. 2007;(22):16–17. URL: <http://en.runeft.ru/upload/iblock/6d1/6d14ccb867ca2e3639a0b3567a53eee4.pdf>
11. Киселев М. Г., Савич В. В., Павич П. Определение краевого угла смачивания на плоских поверхностях. *Вестник Белорусского национального технического университета*. 2006;(1):38–41. URL: <https://rep.bntu.by/handle/data/7007>
12. Каюмов А. А., Игнаткина В. А., Бочаров В. А. и др. Исследование флотационных свойств мономинеральных фракций сульфидов цветных металлов с использованием различных сульфидрильных собирателей с разной молекулярной структурой. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2016;(11):226–237. URL: https://giab-online.ru/files/Data/2016/11/226_237_11_2016.pdf
13. Верхотуров М. В., Амелин С. А., Коннова Н. И. *Обогащение алмазов*. Красноярск: ИПК СФУ; 2009. 207 р.
14. Liu L., Cheng G., Yu W., Yang Ch. Flotation collector preparation and evaluation of oil shale. *Oil Shale*. 2018;35(3):242–253. <https://doi.org/10.3176/oil.2018.3.04>
15. Kasomo R. M., Ombiro S., Rop B., Mutua N. M. Investigation and comparison of emulsified diesel oil and flomin C 9202 as a collector in the beneficiation of ultra-fine coal by agglomeration. *International Journal of Oil, Gas and Coal Engineering*. 2018;6(4):74–80. <https://doi.org/10.11648/j.ogce.20180604.15>



16. Tukhvatullina A.Z., Kuryakov V. Supramolecular structures of oil systems as the key to regulation of oil behavior. *Petroleum & Environmental Biotechnology*. 2013;4(4):1–8. <https://doi.org/10.4172/2157-7463.1000152>

17. Лезова С.П., Пестряк И.В. Выбор фракционного состава компаундных собирателей для пенной сепарации алмазов. В: *Материалы XXVI Национальной научно-технической конференции «Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья»*. 26–27 мая 2021 г., Екатеринбург. Екатеринбург: Уральский государственный горный университет; 2021. С. 177–181.

18. Морозов В.В., Чантурия В.А., Двойченкова Г.П., Чантурия Е.Л. Анализ гидрофобных взаимодействий в системе алмаз-органическая фаза – неорганический люминофор при модифицировании спектрально-кинетических характеристик алмазов. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2022;(2):94–104. <https://doi.org/10.15372/FTPRP120220209>

References

1. Chanturiya V.A. Innovation-based processes of integrated and high-level processing of natural and technogenic minerals in Russia. In: *Proceedings of 29th International Mineral Processing Congress*. September 17–21, 2018, Moscow. Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum; 2019. Pp. 3–12.

2. Makhachev A.F., Dvoichenkova G.P., Lezova S.P. Analysis and optimization of compositions of compound collectors for frother separation of diamonds. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2018;(11):178–185. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-11-0-178-185>

3. Verkhoturova V., Elshin I., Nemarov A. et al. Scientific justification and optimum alternative selection to recover hydrophobic properties of diamond surface from “International” tube ore. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2014;(8):51–56. (In Russ.) URL: http://journals.istu.edu/vestnik_irgtu/journals/2014/08

4. Zlobin M.N. Technology of hard grained flotation during beneficiation of diamond-bearing ores. *Gornyi Zhurnal*. 2011;(1):87–89. (In Russ.)

5. Dvoichenkova G.P., Morozov V.V., Chanturia E.L., Kovalenko E.G. Selection of recycled water electrochemical conditioning parameters for preparation of diamond-bearing kimberlite for froth separation. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021;6(3):170–180. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-3-170-180>

6. Morozov V. V., Lezova S. P. Compound collectors based on oil products for frother separation of diamond-bearing kimberlites. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2020;(12):137–146. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-12-0-137-146>

7. Kovalenko E.G. Selection and optimization of the temperature conditions of the kimberlite foam separation process. In: *Proceedings of the XXVI National Scientific and Technical Conference held within the framework of the XIX Ural Mining Decade*. May 26–27, 2021, Yekaterinburg. Yekaterinburg: Ural State Mining University Publ; 2021. Pp. 63–68. (In Russ.)

8. Alekseenko V., Voronov D., Katashevstev M., Pakhomovskiy A. Study of emulsion granulometric composition by means of an optical microscope and a method for automated recognition of objects in digital photos. *Vestnik Irkutskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta*. 2015;(2):99–104. (In Russ.) URL: <http://tom.technolog.edu.ru/files/vidtest.pdf>

9. Bakhmetyev V.V., Sychev M.M. *Alloys microstructure research using VIDEOTEST computer program*. St. Petersburg: SPbGTI (TU); 2011. 17 p. (In Russ.) URL: <http://tom.technolog.edu.ru/files/vidtest.pdf>

10. Test measuring the viscosity of petroleum products using a sinusoidal SV-10 vibro-viscometer of A&D Company Ltd (Japan). *Exposition Oil Gas*. 2007;(22):16–17. URL: <http://en.runeft.ru/upload/iblock/6d1/6d14ccb867ca2e3639a0b3567a53eee4.pdf>

11. Kiselev M.G., Savich V.V., Pavich T.P. Determination of contact wetting angle on flat surfaces. *Vestnik Belorusskogo Natsional'nogo Tekhnicheskogo Universiteta*. 2006;(1):38–41. (In Russ.) URL: <https://rep.bntu.by/handle/data/7007>

12. Kayumov A.A., Ignatkina V.A., Bocharov V.A. et al. Results study of flotation properties mono-mineral fractions of sulfides non-ferrous metals with using a variety of sulfhydryl collectors with different molecular structure. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2016;(11):226–237. (In Russ.) URL: https://giab-online.ru/files/Data/2016/11/226_237_11_2016.pdf

13. Verkhoturov M.V., Amelin S.A., Konnova N.I. *Diamond beneficiation*. Krasnoyarsk: IPK SFU Publ.; 2009. 207 p. (In Russ.)

14. Liu L., Cheng G., Yu W., Yang Ch. Flotation collector preparation and evaluation of oil shale. *Oil Shale*. 2018;35(3):242–253. <https://doi.org/10.3176/oil.2018.3.04>

15. Kasomo R.M., Ombiro S., Rop B., Mutua N.M. Investigation and comparison of emulsified diesel oil and flomin C 9202 as a collector in the beneficiation of ultra-fine coal by aggro-flotation. *International Journal of Oil, Gas and Coal Engineering*. 2018;6(4):74–80. <https://doi.org/10.11648/j.ogce.20180604.15>



16. Tukhvatullina A.Z., Kuryakov V. Supramolecular structures of oil systems as the key to regulation of oil behavior. *Petroleum & Environmental Biotechnology*. 2013;4(4):1–8. <https://doi.org/10.4172/2157-7463.1000152>

17. Lezova S.P., Pestryak I.V. Selection of the fractional composition of compound collectors for the foam separation of diamonds. In: *Proceedings of the XXVI National Scientific and Technical Conference "Scientific foundations and practice of processing ores and technogenic resources"*. May 26–27, 2021, Yekaterinburg. Yekaterinburg: Ural State Mining University Publ.; 2021. Pp. 177–181. (In Russ.)

18. Morozov V.V., Chanturia V.A., Dvoichenkova G.P., Chanturia E.L. Hydrophobic interactions in the diamond-organic liquid-inorganic luminophore system in modification of spectral and kinetic characteristics of diamonds. *Fiziko-Tekhnicheskiye Problemy Razrabotki Poleznykh Iskopaemykh*. 2022;(2):94–104. (In Russ.) <https://doi.org/10.15372/FTPRI20220209>

Информация об авторах

Валерий Валентинович Морозов – доктор технических наук, профессор кафедры общей и неорганической химии, Университет науки и технологий МИСИС, г. Москва, Российская Федерация; ORCID [0000-0003-4105-944X](https://orcid.org/0000-0003-4105-944X), Scopus ID [7402759618](https://scopus.com/authorid/7402759618); e-mail dchmggu@mail.ru

Евгений Геннадьевич Коваленко – кандидат технических наук, главный инженер, институт «Якутнипроалмаз» АК «АЛРОСА»; доцент, Мирнинский Политехнический институт – филиал Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова (МПТИ (ф) СВФУ), г. Мирный, Республика Саха (Якутия), Российская Федерация; Scopus ID [57200340844](https://scopus.com/authorid/57200340844); email kovalenkoeg@alrosa.ru, kovalenkoeg@gmail.ru

Галина Петровна Двойченкова – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт проблем комплексного освоения недр РАН, г. Москва, Российская Федерация; профессор, Мирнинский Политехнический институт – филиал Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова (МПТИ (ф) СВФУ), г. Мирный, Республика Саха (Якутия), Российская Федерация; ORCID [0000-0003-3637-7929](https://orcid.org/0000-0003-3637-7929), Scopus ID [8837172700](https://scopus.com/authorid/8837172700); e-mail dvoigp@mail.ru

Валентина Анатольевна Чуть-Ды – ведущий инженер-технолог, институт «Якутнипроалмаз», АК «АЛРОСА», г. Мирный, Российская Федерация; e-mail Verhoturova-vale@mail.ru

Information about the authors

Valery V. Morozov – Dr. Sci. (Eng.), Professor of Department General and Inorganic Chemistry, National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation; ORCID [0000-0003-4105-944X](https://orcid.org/0000-0003-4105-944X), Scopus ID [7402759618](https://scopus.com/authorid/7402759618); e-mail dchmggu@mail.ru

Evgeny G. Kovalenko – Cand. Sci. (Eng.), Chief Engineer, Yakutnioproalmaz Institute, ALROSA; Associate Professor, Polytechnic Institute (branch) North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov, Mirny, Republic of Sakha (Yakutia), Russian Federation; Scopus ID [57200340844](https://scopus.com/authorid/57200340844); email kovalenkoeg@alrosa.ru, kovalenkoeg@gmail.ru

Galina P. Dvoichenkova – Dr. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Institute of Problems of Integrated Development of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; Professor, Polytechnic Institute (branch) North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov, Mirny, Republic of Sakha (Yakutia), Russian Federation; ORCID [0000-0003-3637-7929](https://orcid.org/0000-0003-3637-7929), Scopus ID [8837172700](https://scopus.com/authorid/8837172700); e-mail dvoigp@mail.ru

Valentina A. Chut-Dy – Leading Process Engineer, Yakutnioproalmaz Institute, ALROSA, Mirny, Russian Federation; e-mail Verhoturova-vale@mail.ru

Поступила в редакцию	18.10.2022	Received	18.10.2022
Поступила после рецензирования	01.11.2022	Revised	01.11.2022
Принята к публикации	15.11.2022	Accepted	15.11.2022



ОБОГАЩЕНИЕ, ПЕРЕРАБОТКА МИНЕРАЛЬНОГО И ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-08-09>

УДК 622.7

**Влияние предварительной сонохимической обработки депрессоров шламов на эффективность сальвиновой флотации**В.Е. Буров¹   , В.З. Пойлов¹ , Ч. Хуан²  , А.В. Чернышев¹, К.Г. Кузьминых¹ ¹ Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Российская Федерация² Университет науки и технологии Цзянси, г.о. Ганьчжоу, Китай vladimire.burov@gmail.com**Аннотация**

Основной источник калийных удобрений – сальвинитовые руды, состоящие в том числе из галита (NaCl), силикатных и глинисто-карбонатных шламов (глинисто-солевых шламов). Обогащение природных калийных руд главным образом осуществляется флотационным методом, при котором происходит разделение KCl, NaCl и глинисто-солевых шламов.

Исследование направлено на выявление влияния предварительной сонохимической обработки реагентов-депрессоров – КМЦ и крахмала – на динамическую вязкость, размер агрегатов, электрокинетический потенциал растворов этих реагентов и на эффективность сальвиновой флотации. Установлено, что сонохимическая обработка растворов депрессоров уменьшает размер агрегатов молекул крахмала более чем в 133 раза, агрегатов молекул КМЦ – с 6 до 4 нм. Выявлено, что сонохимическое воздействие на раствор анионного КМЦ с увеличением акустической мощности смещает электрокинетический потенциал в область отрицательных значений, при этом сонохимическая обработка любой акустической мощности не влияет на дзета-потенциал неионогенного крахмала. Установлено, что сонохимическая обработка понижает динамическую вязкость растворов КМЦ и крахмала: вязкость раствора КМЦ при максимальной акустической мощности 420 Вт снижается на 44 %, вязкость раствора крахмала при той же акустической мощности ультразвука – на 70 %. Кроме того, предварительная сонохимическая обработка депрессоров сальвиновой флотации способствует увеличению извлечения KCl и снижению содержания шламов во флотационном концентрате. Также показана возможность снижения расхода обработанного ультразвуком депрессора. Полученные результаты целесообразно апробировать в опытно-промышленных условиях.

Ключевые слова

обогащение, сальвиновая флотация, ультразвук, депрессор, глинисто-солевой шлам, карбоксиметилцеллюлоза, крахмал, дзета-потенциал, динамическая вязкость, извлечение

Для цитирования

Burov V.E., Poilov V.Z., Huang Z., Chernyshev A.V., Kuzminykh K.G. Effect of sonochemical pretreatment of slurry depressors on sylvite flotation performance. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2022;7(4):298–309. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-08-09>

BENEFICIATION AND PROCESSING OF NATURAL AND TECHNOGENIC RAW MATERIALS

Research paper

Effect of sonochemical pretreatment of slurry depressors on sylvite flotation performanceV. E. Burov¹   , V. Z. Poilov¹ , Z. Huang²  , A. V. Chernyshev¹, K. G. Kuzminykh¹ ¹ Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation² Jiangxi University of Science and Technology, Guanzhou, China vladimire.burov@gmail.com**Abstract**

The main source of potassium fertilizers is sylvite ores consisting primarily of halite (NaCl), silicate and clay-carbonate slurries (clay-salt slurries). Processing of natural potash ores is mainly carried out by the flotation method, which separates KCl, NaCl, and clay-salt slurry. The research is aimed at revealing the effect of sonochemical pretreatment of the depressor reagents, CMC and starch, on dynamic viscosity, aggregate size, electrokinetic potential of these reagent solutions and sylvite flotation performance. It has been established



that sonochemical treatment of depressor solutions decreases the size of aggregates of starch molecules by more than 133 times and that of aggregates of CMC molecules from 6 to 4 nm. It has been revealed that sonochemical treatment of anionic CMC solution shifts the electrokinetic potential towards the area of negative values with an increase in acoustic power, while sonochemical treatment of any acoustic power has no effect on the zeta potential of nonionic starch. It has been found that the sonochemical treatment lowers the dynamic viscosity of CMC and starch solutions: the viscosity of CMC solution at a maximum acoustic power of 420 W decreases by 44 % and the viscosity of starch solution at the same acoustic (ultrasonic) power decreases by 70 %. Furthermore, sonochemical pretreatment of sylvan flotation depressors contributes to an increase in KCl recovery and a decrease in the slurry content in the flotation concentrate. The possibility of reducing the consumption of ultrasonic treated depressor is also demonstrated. It is expedient to test the obtained findings in pilot-plant conditions.

Keywords

processing, sylvan flotation, ultrasound, depressor, clay-salt slurry, carboxymethylcellulose, starch, zeta potential, dynamic viscosity, recovery

For citation

Burov V.E., Poilov V.Z., Huang Z., Chernyshev A.V., Kuzminykh K.G. Effect of sonochemical pretreatment of slurry depressors on sylvan flotation performance. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2022;7(4):298–309. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-08-09>

Введение

Калий вместе с фосфором и азотом является важнейшим компонентом минеральных удобрений, повышающим урожайность сельскохозяйственных растений [1–4]. Основным источником калийных удобрений – сильвинитовые руды, состоящие в том числе из галита (NaCl), силикатных и глинисто-карбонатных шламов (глинисто-солевых шламов; далее – ГСШ) [4, 5]. Обогащение природных калийных руд главным образом осуществляется флотационным методом, при котором происходит разделение KCl, NaCl и ГСШ [6–8].

В России расположено одно из крупнейших в мире месторождений сильвинитовых руд – Верхнекамское месторождение калийно-магниевых солей, которое богато залежами ценного сильвинита [9, 10]. Однако в настоящее время часть лучших сырьевых источников уже выработана, в связи с чем начинают использоваться пласты с меньшим содержанием полезного компонента и с более высоким содержанием ГСШ, что приводит к ухудшению показателей технологии [11, 12]. При этом наиболее негативное влияние на флотацию калийных солей оказывают глинисто-солевые минералы (CaSO_4 , MgCO_3 , $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$, Fe_2O_3 , $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, F^- , MgCl_2), которые обладают большей катионной ёмкостью к солям первичных алифатических аминов, применяемых в качестве реагентов-собирающих сильвиновой флотации, что является одной из основных причин их негативного воздействия на флотацию KCl [6, 11, 13, 14]. Конкурирующая адсорбция аминов на ГСШ препятствует их адсорбции на кристаллах хлорида калия, что приводит к ухудшению или прекращению процесса флотации [12, 15].

С целью снижения содержания ГСШ в руде перед сильвиновой флотацией применяют механическое или флотационное обесшламливание калийных руд [12]. Однако такие методы не способны полностью удалить ГСШ. Оставшиеся в руде даже десятые доли процента глинисто-солевых примесей уменьшают извлечение хлорида калия во флотационный концентрат, а также вызывают необходимость дополнительного введения в процесс дорогостоящих собирав-

лей (алифатических аминов) [16, 17]. В связи с этим на стадии сильвиновой флотации до ввода в процесс реагента-собирающего рудную пульпу кондиционируют реагентами-депрессорами, которые, адсорбируясь на поверхности ГСШ, изменяют характер межфазных молекулярных взаимодействий, благодаря чему повышается селективность флотации – увеличивается выход KCl, снижается содержание ГСШ во флотационном концентрате, а также уменьшается расход реагентов-собирающих [8, 11, 12, 18, 19].

Известно большое число реагентов-депрессоров для флотации калийных руд, из которых можно отметить органические реагенты: карбоксиметилцеллюлоза (КМЦ), модифицированные карбамидформальдегидные смолы, модифицированный крахмал, гуаровая камедь, эпоксидная смола и др. [11, 12, 18]. Перечисленные химические соединения хорошо зарекомендовали себя в качестве реагентов, депрессирующих действие ГСШ. Однако молекулы органических депрессоров (например, КМЦ и крахмал) в растворах склонны к образованию ассоциатов и надмолекулярных структур, образование которых возрастает с повышением концентрации реагента. Кроме того, для ионогенных полимеров, в частности, КМЦ, также характерны глобулизация молекул и усиление внутримолекулярного взаимодействия [20–22]. С увеличением концентрации растворов органических депрессоров наблюдается рост вязкости раствора и одновременно ухудшение депрессирующих свойств [21]. Поэтому на производстве стремятся использовать разбавленные растворы реагентов-депрессоров (например, КМЦ < 2 %), что позволяет повысить депрессирующее действие реагентов и снизить его удельный расход. Однако применение разбавленных растворов реагентов-депрессоров ведёт к дополнительному введению воды в технологический процесс, что вызывает потери хлорида калия вследствие растворения и накопления избыточных щёлоков.

Перспективным способом решения перечисленных проблем является предварительная сонохимическая обработка высококонцентрированных растворов

органических депрессоров [23]. За счёт ультразвуковой кавитации изменяются различные физико-химические свойства коллоидной системы: вязкость, размер агрегатов молекул депрессора, электрокинетический потенциал, величина адсорбции молекул депрессора на глинисто-солевых примесях, что, в свою очередь, может повысить эффективность флотации калийных руд [24, 25]. В литературе практически отсутствуют сведения о влиянии предварительной ультразвуковой обработки депрессоров как на физико-химические свойства реагента-депрессора, так и на показатели флотации силивинитовых руд.

Цель данного исследования – установить влияние предварительной сонохимической обработки депрессоров (КМЦ и крахмала) на физико-химические свойства растворов реагентов, а также на эффективность силивиновой флотации.

1. Материалы и методы

1.1. Флотационный реагент-депрессор

Для изучения влияния сонохимической обработки на реагент-депрессор силивиновой флотации использовали два вида органических депрессоров – карбоксиметилцеллюлозу (степень полимеризации 750–850) и растворимый крахмал амилодекстрин (ХЧ) (далее – крахмал), из которых готовили 4%-ный водный раствор КМЦ и 4%-ный водный раствор крахмала при температурах растворов 30 °С.

При флотационном обогащении силивинитовой руды реагент-депрессор вносили в пульпу перед добавлением эмульсии собирателя и вспенивателя на стадии силивиновой флотации. При этом удельный расход КМЦ составлял 400 г/т руды, крахмала – 160 г/т руды [11].

1.2. Сонохимическая обработка раствора депрессора

Сонохимическую обработку раствора депрессора проводили с помощью ультразвуковой установки, представленной на рис. 1. В качестве источника ультразвуковых колебаний использовали ультразвуковой генератор с пьезоэлектрической колебательной системой с развитой излучающей поверхностью из

титанового сплава в металлическом корпусе с принудительным воздушным охлаждением модели УЗТА-0,8/22-ОМУ серии «Волна».

Установка имеет номинальную рабочую частоту $22 \pm 1,65$ кГц, интенсивность излучения не менее $3,5$ Вт/см². Электронный генератор с таймером и регулятором мощности (40–100 %). При ультразвуковом воздействии 100 % мощности полная потребляемая мощность составляет 1600 В·А, активная потребляемая мощность составляет 650 Вт, при этом в среду вводится акустическая мощность около 420 Вт. Поддержание температуры раствора депрессора осуществляли с помощью термостата 3. В реактор 4 помещали раствор депрессора в количестве 500 мл и проводили его ультразвуковую обработку при различных значениях акустической мощности (от 168 до 420 Вт с шагом 84) и длительности воздействия 150 с. Для сравнения проводили контрольные опыты без сонохимической обработки при идентичных условиях.

1.3. Измерение размера агрегатов и дзета-потенциала раствора депрессора

Измерение размера агрегатов и дзета-потенциала депрессоров КМЦ и крахмала осуществляли с помощью лазерного прибора «Zetasizer Nano ZS» по методу динамического рассеяния света с использованием технологии неинвазивного обратного рассеяния. Значения вязкости, использованные для измерения размера агрегатов и дзета-потенциала, брали равными справочным значениям вязкости воды при заданной температуре. Индекс преломления раствора КМЦ составляет 1,515; крахмала – 1,340.

На приборе производили последовательно от 10 замеров размеров агрегатов в объёме образца, затем усредняли их. На один образец приходилось три параллельных измерения.

1.4. Измерение вязкостно-температурных свойств раствора депрессора

Определение динамической вязкости обработанных и не обработанных ультразвуком растворов депрессоров осуществляли при помощи вибровискозиметра SV-10 AND. Методика определения вязкости основана на изменении резонансной частоты коле-

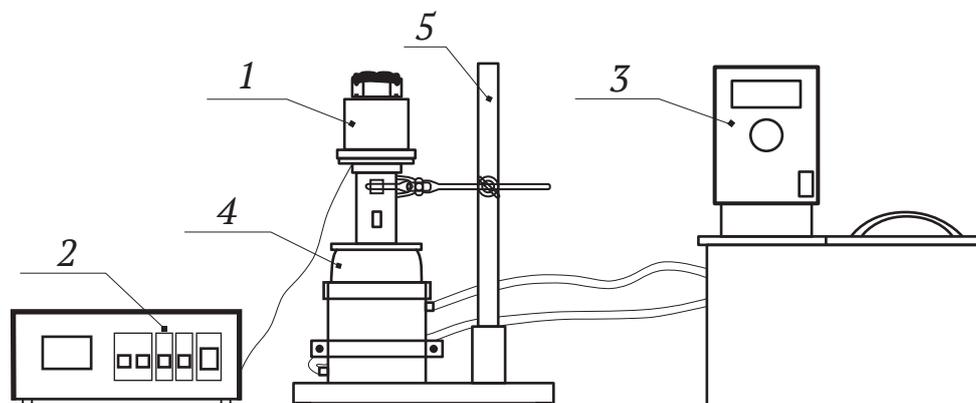


Рис. 1. Схематичное изображение лабораторной установки для сонохимической обработки реагента-депрессора: 1 – излучательный элемент; 2 – ультразвуковой генератор; 3 – термостат; 4 – реактор с рубашкой; 5 – штатив



баний в жидкости различной вязкости при заданном известном значении плотности раствора. Исходная плотность 4 %-ного раствора КМЦ при температуре 30 °С составляла 1,02 кг/м³; 4 %-ного раствора крахмала при температуре 30 °С – 1,01 кг/м³.

Измерение значения температуры раствора производили термодатчиками вибровискозиметра непосредственно во время измерения вязкости. Изменение температуры растворов депрессоров осуществляли с помощью лабораторного термостата.

Предел допускаемой относительной погрешности вискозиметра равен ±3 %, повторяемость результатов измерения вязкости – не более 1 % (стандартное отклонение).

1.5. Эксперименты по флотации

В качестве сырья для получения флотационного хлористого калия использовали сухую сильвинитовую руду флотационной фабрики БКПРУ-3 и питание сильвиновой флотации (обесшламленную сильвинитовую руду) флотационной фабрики СКРУ-3 ПАО «Уралкалий» различного химического состава, представленного в табл. 1.

Для приготовления насыщенных растворов, применявшихся при исследовании сильвиновой флотации, использовали хлорид калия марки «ХЧ» и хлорид натрия марки «ХЧ». Насыщенный раствор использовали однократно.

В качестве собирателя и вспенивателя для сильвиновой флотации использовали амины первичные (дистиллированные) гранулированные фракции C₁₇–C₂₀ и триэтиленгликоль состава C₆H₁₄O₄ соответственно. Для приготовления раствора солянокислого амина в дистиллированную воду вносили твёрдый стеариламин (предварительно измельчённый), концентрация которого в растворе составляет 0,8 масс. %, и химически чистую соляную кислоту в количестве, на 15 % превышающем необходимое для нейтрализации стеариламина. Получившийся раствор перемешивали и термостатировали при температуре 70 °С в течение 90 мин. Далее температуру реагента снижали до рабочей, равной 60 °С. Затем в солянокислый раствор амина вносили вспениватель в количестве 30 % от массы сухого собирателя.

Эксперименты по флотации проводили с использованием лабораторной флотационной машины «ФМЛ 3/240 ФЛ». Сухую исходную руду смешивали с маточным щёлоком при соотношении фаз Ж/Т = 2,5. В полученную пульпу при перемешивании добавляли сначала обработанный или необработанный ультразвуком депрессор при заданном расходе реагента, кондицио-

нировали в течение 3 мин, далее вносили в рудную суспензию композицию состава «собиратель-вспениватель» при расходе композиции 65 г/т руды, после чего кондиционировали в течение 1 мин. Готовой рудной суспензией заполняли камеру лабораторной флотомашинки объёмом 500 мл (масса руды 194 г, объём щёлока 400 мл). Включали флотомашину со скоростью вращения импеллера 29 об/с и расходом воздуха 100 л/ч. Продолжительность процесса флотации составляла 6 мин (на один образец проводили три флотации, результаты которых усредняли). Отобранные пенный и камерный продукты фильтровали с помощью вакуумного фильтра, затем сушили до постоянной массы. После сушки проводили гравиметрический анализ полученных продуктов и определяли содержание хлористого калия во флотационном концентрате и камерном продукте с использованием пламенного фотометра ПФА 378. Анализ на содержание ГСШ во флотационном концентрате производили с помощью энергодисперсионного рентгенофлуоресцентного спектрометра EDX-8100P «Shimadzu» с продувкой гелием. При этом к ГСШ относили элементы Ca, Si, Al, Mg, S и Fe.

2. Обсуждение результатов

2.1. Влияние сонохимической обработки депрессора на размер агрегатов

Результаты исследований влияния режимов сонохимической обработки растворов депрессоров на размер агрегатов (дифференциальные кривые объёмного распределения агрегатов молекул КМЦ и крахмала по размеру) представлены на рис. 2 и 3.

Как видно из рис. 2, с увеличением мощности сонохимического воздействия размер агрегатов молекул смещается в сторону уменьшения: от 6 нм (без ультразвуковой обработки) до 4 нм (при акустической мощности ультразвука 420 Вт). При воздействии ультразвука на концентрированные растворы КМЦ (выше 1%) происходит разрыв связей макромолекул, которые разрыхляются и приобретают более развёрнутую форму [26–28].

Как видно из анализа дифференциальных кривых объёмного распределения агрегатов молекул крахмала, представленных на рис. 3, крупные крахмальные агрегаты без сонохимического воздействия имели различный размер: около 50, 900 и 8000 нм. Больше всего наблюдались агрегаты размером около 8000 нм, на что указывает кривая объёмного распределения (кривая 1). При постепенном увеличении акустической мощности ультразвукового воздействия кривые распределения агрегатов крахмала смещались в сто-

Таблица 1

Химический состав сильвинитовых руд флотационной фабрики БКПРУ-3 и питания сильвиновой флотации флотационной фабрики СКРУ-3 ПАО «Уралкалий»

Флотационная фабрика	Массовая доля компонентов, %					Фракция
	NaCl	KCl	Н.О.*	MgCl ₂	CaSO ₄	
БКПРУ-3	66,65	26,59	4,59	0,27	1,9	(–0,900 + 0,315) мм
СКРУ-3	70,30	27,10	0,46	0,13	2,01	(–0,900 + 0,315) мм

* Н.О. – нерастворимый осадок.

рону уменьшения размеров агрегатов, также снижалась высота пиков объёмного распределения. При этом после ультразвуковой обработки пик распределения агрегатов в области 8000 нм исчезает. При акустической мощности 420 Вт наблюдается максимальное уменьшение агрегатов до 60 нм с объёмным распределением 20 % и 600 нм с объёмным распределением менее 10 %. Таким образом, после воздействия ультразвуком максимальной мощности размер агрегатов крахмала снизился более чем в 133 раза: с 8000 нм до 60 нм.

2.2. Влияние сонохимической обработки депрессора на изменение электрокинетического потенциала

Результаты исследований влияния сонохимической обработки растворов реагентов-депрессоров на дзета-потенциал представлены на рис. 4.

Как видно из рис. 4 (кривая 1), значение дзета-потенциала раствора КМЦ постепенно смещается

в область отрицательных значений с увеличением мощности сонохимической обработки. При этом максимальное отрицательное значение дзета-потенциала наблюдается при мощности ультразвука 420 Вт и составляет $-35,85 \pm 1,79$ мВ. Следует учесть, что КМЦ относится к группе ионогенных анионных депрессоров, имеющих в своём составе карбоксильную группу, которая придаёт данному реагенту отрицательное значение электрокинетического потенциала. Как уже было отмечено ранее (см. пп. 2.1), ультразвук разрывает внутренние связи надмолекулярных структур КМЦ, что ведёт к развёртыванию формы и увеличению анионных структур, которые смещают дзета-потенциал в область отрицательных значений [20, 24]. Поскольку сонохимическая обработка раствора КМЦ снижает дзета-потенциал депрессора, сорбция агрегатов КМЦ на поверхности положительно заряжённой частицы шлама, например гематита, должна возрастать, за счёт чего, возможно, увеличится гидрофильность этих частиц.

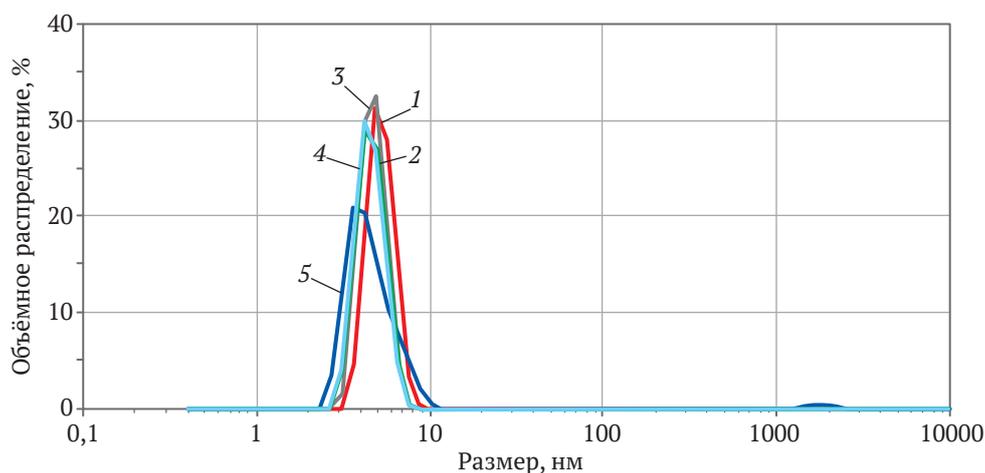


Рис. 2. Дифференциальные кривые объёмного распределения агрегатов молекул обработанного и не обработанного ультразвуком раствора КМЦ при длительности воздействия ультразвука 150 с: 1 (красный) – без ультразвуковой обработки; 2 (зелёный) – 168 Вт; 3 (серый) – 252 Вт; 4 (бирюзовый) – 336 Вт; 5 (синий) – 420 Вт

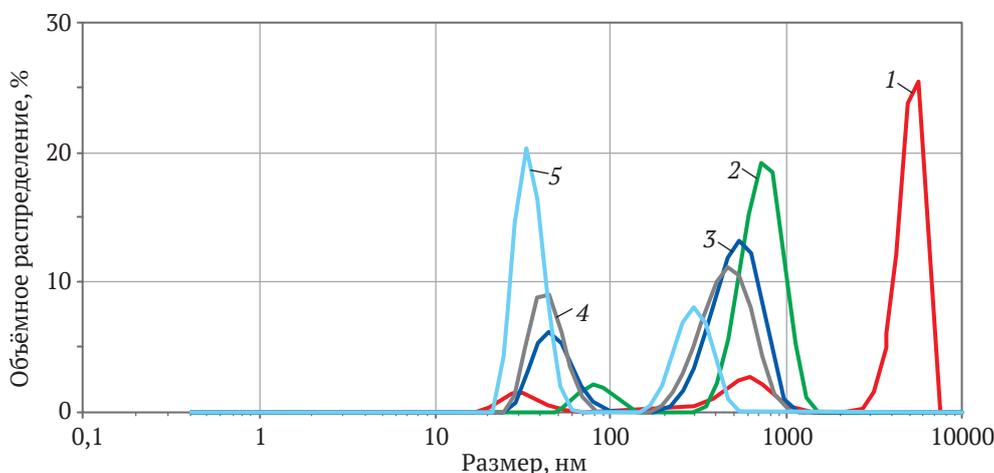


Рис. 3. Дифференциальные кривые объёмного распределения агрегатов молекул обработанного и не обработанного ультразвуком раствора крахмала при длительности воздействия ультразвука 150 с: 1 (красный) – без ультразвуковой обработки; 2 (зелёный) – 168 Вт; 3 (синий) – 252 Вт; 4 (серый) – 336 Вт; 5 (бирюзовый) – 420 Вт

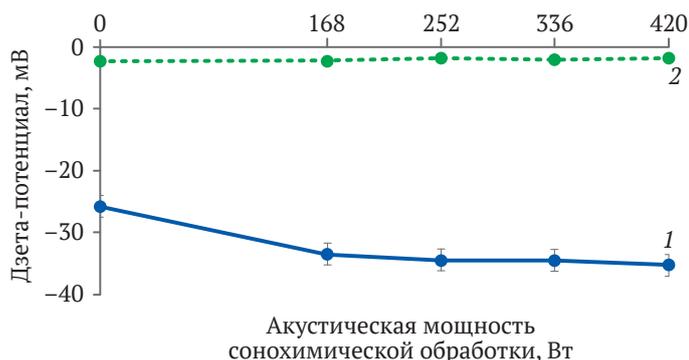


Рис. 4. Влияние ультразвуковой обработки депрессора на изменение электрокинетического потенциала: 1 – раствор КМЦ; 2 – раствор крахмала

Из анализа рис. 4 (кривая 2) видно, что сонохимическая обработка при любой акустической мощности незначительно влияет на дзета-потенциал агрегатов крахмала. При этом электрокинетический потенциал при всех акустических мощностях сонохимической обработки близок к 0. Выявленные особенности объясняются тем, что крахмал относится к группе неионогенных органических депрессоров, не несущих заряд [29, 30]. Закрепление данного депрессора на поверхности силикатных шламов, например кварца, происходит путём образования водородных связей, где участвует большое число полярных групп каждой молекулы депрессора, при этом достигается прочная связь депрессора с минералом [31, 32]. Возможно, при воздействии ультразвука на раствор крахмала агрегаты крахмала, как и в случае с КМЦ, разрыхляются, увеличивая тем самым количество активных полярных групп, которые прочнее связываются с поверхностью минералов шлама и ведут к повышению его гидрофильности.

2.3. Влияние сонохимической обработки на вязкостно-температурные свойства реагента-депрессора

Влияние ультразвуковой обработки растворов КМЦ и крахмала на изменение динамической вязкости и температуры представлены в табл. 2.

Из анализа табл. 2 видно, что с увеличением акустической мощности сонохимического воздействия на реагенты динамическая вязкость растворов снижается, тогда как их температура возрастает. Максимальное снижение динамической вязкости и повышение температуры раствора КМЦ наблюдаются при сонохимической обработке мощностью 420 Вт и составляют $5,05 \pm 0,05$ мПа·с и 38°C соответственно; при ультразвуковой обработке той же акустической мощности раствора крахмала вязкость снижается до $2,66 \pm 0,03$ мПа·с, а температура раствора повышается до 41°C . Наибольшее воздействие сонохимическая обработка оказала на раствор крахмала, в котором при использовании максимальной акустической мощности ультразвука динамическая вязкость снизилась в 3,3 раза.

При этом, как видно из табл. 2, повышение температуры растворов реагентов без использования сонохимической обработки незначительно понижает динамическую вязкость растворов, что свидетельствует о том, что наибольший вклад в изменение вязкости оказывает ультразвуковая обработка. Следует учитывать, что при сонохимической обработке образуются, а затем схлопываются находящиеся в жидкости пузырьки газа, из-за чего локально повышаются давление и температура [21, 33, 34]. При этом локальное изменение температуры повышает температуру всего раствора, а изменение давления приводит к диспергированию агрегатов коллоидного раствора, в связи с чем вязкость среды снижается.

Таблица 2

Влияние ультразвуковой обработки и повышения температуры растворов КМЦ и крахмала на динамическую вязкость

Тип депрессора	Акустическая мощность, Вт	Температура раствора, °C	Динамическая вязкость раствора, мПа·с	Температура раствора, °C	
				с применением УЗ-обработки	без использования УЗ-обработки
КМЦ	0	30	$9,01 \pm 0,09$	30	$9,01 \pm 0,09$
	168	32	$7,27 \pm 0,07$	32	$8,74 \pm 0,09$
	252	35	$5,70 \pm 0,06$	35	$8,44 \pm 0,08$
	336	37	$5,18 \pm 0,05$	37	$8,24 \pm 0,08$
	420	38	$5,05 \pm 0,05$	38	$8,14 \pm 0,08$
Крахмал	0	30	$8,87 \pm 0,09$	30	$8,87 \pm 0,09$
	168	32	$4,18 \pm 0,04$	32	$8,27 \pm 0,08$
	252	35	$3,33 \pm 0,03$	35	$8,07 \pm 0,08$
	336	38	$2,92 \pm 0,03$	38	$7,78 \pm 0,08$
	420	41	$2,66 \pm 0,03$	41	$7,49 \pm 0,07$



2.4. Влияние сонохимической обработки депрессора на содержание глинисто-солевого шлама в концентрате и извлечение КС1

В экспериментах по флотационному разделению компонентов сильвинита исследовали влияние предварительной сонохимической обработки реагентов-депрессоров – КМЦ и крахмала – на степень извлечения КС1 и содержание глинисто-солевого шлама в концентрате. В данных исследованиях использовали сильвинитовую руду флотационной фабрики БКПРУ-3 с высоким содержанием Н.О. (исходный состав руды представлен в табл. 1). Результаты показаны в табл. 3.

Из анализа табл. 3 видно, что использование не обработанного ультразвуком раствора реагента КМЦ снижает содержание глинисто-солевого шлама в концентрате до $22,84 \pm 0,46$ масс. % и повышает степень извлечения хлорида калия на 1,44 % в сравнении с результатом опыта, где не применялся депрессор. При воздействии сонохимической обработки раствора КМЦ акустической мощностью 168–252 Вт наблюдается дальнейшее увеличение степени извлечения КС1 и снижение содержания глинисто-солевого шлама во флотационном концентрате (опыты 3–4). При этом наилучшие показатели (повышение степени извлечения КС1 и снижение содержания шламов) наблюдается при акустической мощности ультразвука 252 Вт. Однако дальнейшее увеличение акустической мощности сонохимической обработки до 336–420 Вт (опыты 5–6) снижает эффективность действия обработанного ультразвуком депрессора. Аналогичные закономерности наблюдаются и при использовании обработанного ультразвуком крахмала (опыты 8–11). Оптимальная акустическая мощность, при которой наблюдается максимальное значение степени извлечения КС1 и минимальное содержание шламов во флотационном концентрате, составляет 252 Вт.

Положительное влияние предварительной сонохимической обработки депрессоров на эффективность флотации в первую очередь связано с воздействием ультразвуковой кавитации, которая способствует диспергированию крупных агрегатов КМЦ и крахмала (см. пп. 2.1 и 2.2), за счёт чего увеличивается количество активных полярных групп, которые, возможно, прочнее связываются с поверхностью шламов и ведут к повышению его гидрофильности, тем самым улучшая флотацию сильвина.

Снижение извлечения сильвина и увеличение содержания шлама в концентрате при использовании обработанных высокими мощностями ультразвука реагентов-депрессоров, скорее всего, связаны с процессами деструкции и окисления органических макромолекул КМЦ и крахмала, которые при этом теряют свою активность [35–37].

2.5. Использование предварительной сонохимической обработки для снижения расхода реагента-депрессора

С целью подтверждения возможности снижения расхода депрессора сильвиновой флотации были проведены лабораторные эксперименты по флотации, результаты которых описаны в табл. 4. В качестве депрессора был выбран крахмал, так как по сравнению с КМЦ он эффективнее повышает степень извлечения КС1 (см. пп. 2.4). Расход реагента-депрессора снижали со 160 до 100 г/т руды с шагом 10, при этом сонохимической обработке подвергали только раствор крахмала. Критическим расходом депрессора считали тот, при котором следующий за ним расход ухудшал степень извлечения сильвина по сравнению с использованием не обработанного ультразвуком депрессора (отмечен «160*»). В данных исследованиях использовали питание сильвиновой флотации флотационной фабрики СКРУ-3 с низким содержанием Н.О., состав которого представлен выше в табл. 1.

Таблица 3

Влияние предварительной сонохимической обработки депрессора на содержание глинисто-солевого шлама во флотационном концентрате и степень извлечения КС1

№ опыта	Депрессор	Акустическая мощность, Вт	Содержание глинисто-солевого шлама в концентрате, масс. %	Степень извлечения КС1, %
1	Без использования депрессора	Без использования сонохимической обработки	$25,70 \pm 0,51$	$23,07 \pm 0,05$
2	КМЦ	Без использования сонохимической обработки	$22,84 \pm 0,46$	$24,51 \pm 0,32$
3		168	$21,85 \pm 0,44$	$25,36 \pm 1,11$
4		252	$9,57 \pm 0,19$	$29,68 \pm 2,25$
5		336	$11,41 \pm 0,23$	$28,16 \pm 0,23$
6		420	$17,98 \pm 0,36$	$25,26 \pm 1,01$
7		Крахмал	Без использования сонохимической обработки	$12,98 \pm 0,26$
8	168		$9,14 \pm 0,18$	$28,86 \pm 1,27$
9	252		$7,02 \pm 0,14$	$30,29 \pm 0,05$
10	336		$26,19 \pm 0,52$	$20,76 \pm 0,86$
11	420		$31,85 \pm 0,64$	$19,79 \pm 2,08$



Таблица 4

Влияние расхода обработанного ультразвуком депрессора на степень извлечения КСl при акустической мощности ультразвука 252 Вт и длительности воздействия 150 с

Расход депрессора, г/т руды	160*	160	150	140	130	120	110	100
Степень извлечения КСl, %	55,72±0,25	62,05±2,02	60,31±0,14	59,82±0,99	59,32±1,69	57,92±3,78	54,84±0,68	52,02±0,23

* Использование необработанного ультразвуком раствора депрессора.

Из анализа данных табл. 4 следует, что предварительная сонохимическая обработка раствора крахмала с расходом 160 г/т руды повышает степень извлечения хлорида калия по сравнению с не обработанным ультразвуком депрессором (160*). Снижение расхода обработанного ультразвуком депрессора до 120 г/т руды уменьшает степень извлечения КСl, при этом она остаётся выше на 2,2 % по сравнению со степенью извлечения КСl в эксперименте, в котором депрессор не обрабатывался ультразвуком. Дальнейшее понижение расхода реагента до 110–100 г/т уменьшает степень извлечения КСl ниже критического (160*) на несколько процентов.

Таким образом, используя предварительную сонохимическую обработку депрессора, можно не только повысить степень извлечения КСl в процессе сильвиновой флотации, но и снизить расход реагента. Полученные результаты целесообразно проверить в промышленных условиях.

Заключение

Изучено влияние предварительной сонохимической обработки реагентов-депрессоров (КМЦ и крахмал) на динамическую вязкость, размер агрегатов молекул, электрокинетический потенциал растворов

этих реагентов и на эффективность сильвиновой флотации. Установлено, что сонохимическая обработка растворов КМЦ уменьшает размер агрегатов молекул с 6 до 4 нм, а крахмала – с 8000 до 60–600 нм. Выявлено, что сонохимическая обработка раствора анионного КМЦ с увеличением акустической мощности ультразвука смещает в отрицательную область дзета-потенциал, но не оказывает влияния на электрокинетический потенциал неионогенного крахмала. Выявлено, что сонохимическое воздействие на растворы КМЦ и крахмала снижает динамическую вязкость реагентов. Установлено, что предварительная сонохимическая обработка депрессоров при акустической мощности 168 и 252 Вт повышает степень извлечения КСl и снижает содержание шламов во флотационном концентрате. Кроме того, показана возможность снижения расхода обработанного ультразвуком депрессора. Таким образом, предварительная сонохимическая обработка реагентов-депрессоров позволяет улучшить показатели сильвиновой флотации за счёт диспергирования реагентов и изменения физико-химических характеристик депрессоров, что может быть использовано в технологии флотационного обогащения сильвинитовых руд после проведения опытно-промышленных испытаний.

Список литературы

1. Huang X., Cheng C., Zhong H. et al. Flotation of sylvite from potash ore by using the Gemini surfactant as a novel flotation collector. *Minerals Engineering*. 2019;132:22–26. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.11.055>
2. Li E., Du Z., Yuan S., Cheng F. Low temperature molecular dynamic simulation of water structure at sylvite crystal surface in saturated solution. *Minerals Engineering*. 2015;83:53–58. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2015.08.012>
3. Li E., Du Z., Li D., Cheng F. Specific ion effects of salt solutions on colloidal properties of octadecylamine hydrochloride. *Journal of Surfactants and Detergents*. 2017;20(2):483–491. <https://doi.org/10.1007/s11743-016-1923-7>
4. Wang X., Miller J.D., Cheng F., Cheng H. Potash flotation practice for carnallite resources in the Qinghai Province, PRC. *Minerals Engineering*. 2014;66–68:33–39. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.04.012>
5. Батулин Е.Н., Меньшикова Е.А., Блинов С.М. и др. Проблемы освоения крупнейших калийных месторождений мира. *Современные проблемы науки и образования*. 2012;(6):613–621. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=7513>
6. Дихтиевская Л.В., Шломина Л.Ф., Осипова Е.О. и др. Флотационное обогащение калийных руд. *Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия химических наук*. 2019;55(3):277–287. <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2019-55-3-277-287>
7. Du H., Ozdemir O., Wang X. et al. Flotation chemistry of soluble salt minerals: from ion hydration to colloid adsorption. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2014;31(1):1–20. <https://doi.org/10.1007/BF03402344>
8. Cao Q., Du H., Miller J.D. et al. Surface chemistry features in the flotation of KCl. *Minerals Engineering*. 2010;23(5):365–373. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2009.11.010>



9. Chaikovskiy I.I., Korotchenkova O.V., Trapeznikov D.E. A new genetic type of leaching zone in salts of the Verkhnyaya Kama potassium salt deposit: hydrochemical, mineralogical, and structural indicators. *Lithology and Mineral Resources*. 2019;54(4):308–319. <https://doi.org/10.1134/S0024490219040023>

10. Чайковский И.И. Эпигенетическая трансформация калийных и магниевых руд Верхнекамского месторождения солей. В: *Рудогенез: материалы международной конференции*. Миасс, Екатеринбург, 2–7 февраля 2008. С. 331–338.

11. Кибанова М.С., Лановецкий С.В. Исследование влияния реагентов-депрессоров шламов на технологические показатели основной сальвинитовой флотации хлорида калия. *Молодежная наука в развитии регионов*. 2021;1:301–303.

12. Чернышев А.В., Черепанова М.В. Совершенствование стадии шламовой флотации в переработке сальвинита. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология*. 2020;(1):113–129. URL: http://vestnik.pstu.ru/biohim/archives/?id=&folder_id=9158

13. Ведрова В.В., Середкина О.Р., Рахимова О.В. Способы переработки глинисто-солевых шламов в производстве калийных удобрений. *Молодежная наука в развитии регионов*. 2018;1:228–230.

14. Иванов А.Г. Дифференциация минералов галопелитов в процессе флотационного обогащения сальвинитовых руд Верхнекамского месторождения. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология, нефтегазовое и горное дело*. 1999;(1):74–76. URL: <https://repository.geologyscience.ru/bitstream/handle/123456789/9106/p142.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

15. Можейко Ф.Ф., Поткина Т.Н., Шевчук В.В., Стефанович С.Ч. Интенсификация процессов обезвоживания глинисто-солевых дисперсий, модифицированных высокомолекулярными защитными реагентами-депрессорами. *Труды БГТУ №3. Химия и Технология Неорганических Веществ*. 2015;(3):35–40. URL: <https://elib.belstu.by/bitstream/123456789/14999/1/mozheyko-f.-f.-potkina-t.-n.-shevchuk-v.-v.-stsefanovich-s.-ch.-intensification-of-dehydration.pdf>

16. Олиферович Д.С., Шилин Л.Ю., Батюков С.В., Пригара В.Н. Анализ и учет факторов, влияющих на технологический процесс флотации калийных руд. *Доклады Белорусского Государственного университета информатики и радиоэлектроники*. 2009;(2):59–66. URL: https://libeldoc.bsuir.by/bitstream/123456789/31635/1/Oliferovich_The.PDF

17. Титков С.Н., Гуркова Т.М., Пантелеева Н.Н. и др. Активация катионной флотации калийных и калийно-магниевых руд с применением новых реагентов. *Обогащение руд*. 2005;(6):37–42.

18. Кибанова М.С., Лановецкий С.В. Обзор флотационных реагентов, используемых в технологии обогащения сальвинитовых руд. *Молодежная наука в развитии регионов*. 2020;1:287–291.

19. Xuemin Q., Hongying Y., Guobao C. et al. Inhibited mechanism of carboxymethyl cellulose as a galena depressant in chalcopyrite and galena separation flotation. *Minerals Engineering*. 2020;150:106273. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106273>

20. Liu P., Gao W., Zhang X. et al. Effects of ultrasonication on the properties of maize starch/stearic acid/sodium carboxymethyl cellulose composite film. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2021;72:105447. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105447>

21. Iida Y., Tuziuti T., Yasui K. et al. Control of viscosity in starch and polysaccharide solutions with ultrasound after gelatinization. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2008;9(2):140–146. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2007.03.029>

22. Sujka M., Jamroz J. Ultrasound-treated starch: SEM and TEM imaging, and functional behaviour. *Food Hydrocolloids*. 2013;31(2):413–419. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2012.11.027>

23. Chen Y., Truong V.N.T., Bu X., Xie G. A review of effects and applications of ultrasound in mineral flotation. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2020;60:104739. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104739>

24. Пойлов В.З., Буров В.Е., Галлямов А.Н., Федотова О.А. Сонохимическая активация раствора солянокислого амина, используемого в качестве собирателя в технологии флотации сальвинитовых руд. *Обогащение руд*. 2021;(5):15–26. <https://doi.org/10.17580/or.2021.05.04>

25. Burov V.E., Gallyamov A.N., Fedotova O.A., Poilov V.Z. The ultrasonic treatment influence on pH solution of hydrochloric amine. In: *All-Russian Scientific and Practical Conference "Chemistry. Ecology. Urbanistics"*. 2021. Vol. 2. Pp. 224–227. URL: https://ceu.pstu.ru/wp-content/uploads/2021/06/Himiyaekologiyaurbanistika_Tom-2.pdf

26. Liu H., Du Y.M., Kennedy J.F. Hydration energy of the 1,4-bonds of chitosan and their breakdown by ultrasonic treatment. *Carbohydrate Polymers*. 2007;68(3):598–600. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2006.11.004>

27. Liu P., Wang R., Kang X. et al. Effects of ultrasonic treatment on amylose-lipid complex formation and properties of sweet potato starch-based films. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2018;44:215–222. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.02.029>

28. Savitri E., Juliastuti S.R., Handaratri A. et al. Degradation of chitosan by sonication in very-low-concentration acetic acid. *Polymer Degradation and Stability*. 2014;110:344–352. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2014.09.010>



29. Wu Z., Qiao D., Zhao S. et al. Nonthermal physical modification of starch: An overview of recent research into structure and property alterations. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2022;203:153–175. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.01.103>
30. Huang J., Wang Z., Fan L., Ma S. A review of wheat starch analyses: Methods, techniques, structure and function. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2022;203:130–142. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.01.149>
31. Титков С.Н. Активация действия катионных реагентов-собираателей. *Записки Горного института*. 2005;165:191–195. URL: <https://pmi.spmi.ru/index.php/pmi/article/view/8289>
32. Бочаров В.А., Хачатрян Л.С., Игнаткина В.А., Баатархуу Ж. О выборе способов разделения сульфидного медно-молибденового концентрата с использованием высокомолекулярных органических депрессоров. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2007;(8):235–242.
33. Shen H., Guo Y., Zhao J. et al. The multi-scale structure and physicochemical properties of mung bean starch modified by ultrasound combined with plasma treatment. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2021;191:821–831. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.09.157>
34. Осипович А.Э., Вахрушев В.В., Казанцев А.Л. и др. Влияние ультразвуковой обработки на водную эмульсию солянокислого амина. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология*. 2014;(3):89–96. URL: https://vestnik.pstu.ru/biohim/archives/?id=&folder_id=4235
35. Xu M., Xing Y., Gui X., Cao Y., Wang D., Wang L. Effect of Ultrasonic Pretreatment on Oxidized Coal Flotation. *Energy Fuels*. 2017;31(12):14367–73. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.7b02115>
36. Deb Barma S., Sathish R., Baskey P.K., Biswal S.K. Chemical beneficiation of high-ash indian noncoking coal by alkali leaching under low-frequency ultrasonication. *Energy Fuels*. 2018;32(2):1309–1319. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.7b03291>
37. Barma S.D. Ultrasonic-assisted coal beneficiation: a review. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2019;50:15–35. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.08.016>

References

1. Huang Z., Cheng C., Zhong H. et al. Flotation of sylvite from potash ore by using the Gemini surfactant as a novel flotation collector. *Minerals Engineering*. 2019;132:22–26. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.11.055>
2. Li E., Du Z., Yuan S., Cheng F. Low temperature molecular dynamic simulation of water structure at sylvite crystal surface in saturated solution. *Minerals Engineering*. 2015;83:53–58. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2015.08.012>
3. Li E., Du Z., Li D., Cheng F. Specific ion effects of salt solutions on colloidal properties of octadecylamine hydrochloride. *Journal of Surfactants and Detergents*. 2017;20(2):483–491. <https://doi.org/10.1007/s11743-016-1923-7>
4. Wang X., Miller J.D., Cheng F., Cheng H. Potash flotation practice for carnallite resources in the Qinghai Province, PRC. *Minerals Engineering*. 2014;66–68:33–39. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.04.012>
5. Baturin E.N., Menshikova E.A., Blonov S.M. et al. Problems of the development of the world largest potash deposits. *Sovremennyye Problemy Nauki i Obrazovaniya*. 2012;(6):613–621. (In Russ.) URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=7513>
6. Dikhtievskaya L.V., Shlomina L.F., Osipova E.O. Flotation enrichment of potash ores of different mineralogical composition. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, Chemical Series*. 2019;55(3):277–287. (In Russ.) <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2019-55-3-277-287>
7. Du H., Ozdemir O., Wang X. et al. Flotation chemistry of soluble salt minerals: from ion hydration to colloid adsorption. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2014;31(1):1–20. <https://doi.org/10.1007/BF03402344>
8. Cao Q., Du H., Miller J.D. et al. Surface chemistry features in the flotation of KCl. *Minerals Engineering*. 2010;23(5):365–373. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2009.11.010>
9. Chaikovskiy I.I., Korotchenkova O.V., Trapeznikov D.E. A new genetic type of leaching zone in salts of the Verkhnyaya Kama potassium salt deposit: hydrochemical, mineralogical, and structural indicators. *Lithology and Mineral Resources*. 2019;54(4):308–319. <https://doi.org/10.1134/S0024490219040023>
10. Chaikovskiy I.I. Epigenetic transformation of potassium and magnesium ores in the Verkhnyaya Kama salt deposit. In: *Rudogenez: Collection of Scientific Papers*. Miass, Ekaterinburg, 2–7 February 2008. Pp. 331–338. (In Russ.)
11. Kibanova M.S., Lanovetsky S.V. Study of the effect of slurry depressors on the performance of the rougher sylvin (potassium chloride) flotation. *Molodezhnaya Nauka v Razviti Regionov*. 2021;1:301–303. (In Russ.)
12. Chernyshev A.V., Cherepanova M.V. Improvement of the sludge flotation stage in the processing of sylvinit. *Vestnik of Perm National Research Polytechnic University. Chemical Technology and Biotechnology*. 2020;(1):113–129. (In Russ.) URL: http://vestnik.pstu.ru/biohim/archives/?id=&folder_id=9158



13. Vedrova V.V., Seredkina O.R., Rakhimova O.V. Methods for processing of clay-salt slurry in the production of potash fertilizers. *Molodezhnaya Nauka v Razvitii Regionov*. 2018;1:228–230. (In Russ.)
14. Ivanov A.G. Differentiation of halopelite minerals during flotation processing of sylvinitic ores of the Verkhnekamskoe deposit. *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Geology, Oil and Gas and Mining*. 1999;(1):74–76. (In Russ.) URL: <https://repository.geologyscience.ru/bitstream/handle/123456789/9106/p142.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
15. Mozheyko F.F., Potkina T.N., Shevchuk V.V., Stsefanovich S.Ch. Intensification of dehydration of clay-salt dispersion modified by macromolecular protecting reagent-depressor. *Proceedings of BSTU. No. 3. Chemistry and Technology of Inorganic Substances*. 2015;(3):35–40. (In Russ.) URL: <https://elib.belstu.by/bitstream/123456789/14999/1/mozheyko-f-f.-potkina-t.-n.-shevchuk-v.-v.-stsefanovich-s.-ch.-intensification-of-dehydration.pdf>
16. Oliferovich D.S., Shilin L.Y., Batukov S.V., Prigara V.N. The analysis and the account of factors influencing technological process of flotation of potash ores. *Doklady Belorusskogo Gosudarstvennogo Universiteta Informatiki i Radioelektroniki*. 2009;(2):59–66. (In Russ.) URL: https://libeloc.bsuir.by/bitstream/123456789/31635/1/Oliferovich_The.PDF
17. Titkov S.N., Gurkova T.M., Panteleeva N.N. et al. Potassium and potassium-magnesium ores cation flotation activation by means of new reagents. *Obogashchenie Rud*. 2005;(6):37–42. (In Russ.)
18. Kibanova M.S., Lanovetsky S.V. Review of flotation agents used in the process of sylvinitic ore processing. *Molodezhnaya Nauka v Razvitii Regionov*. 2020;1:287–291 (In Russ.)
19. Xuemin Q., Hongying Y., Guobao C. et al. Inhibited mechanism of carboxymethyl cellulose as a galena depressant in chalcopyrite and galena separation flotation. *Minerals Engineering*. 2020;150:106273. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106273>
20. Liu P., Gao W., Zhang X. et al. Effects of ultrasonication on the properties of maize starch/stearic acid/sodium carboxymethyl cellulose composite film. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2021;72:105447. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105447>
21. Iida Y., Tuziuti T., Yasui K. et al. Control of viscosity in starch and polysaccharide solutions with ultrasound after gelatinization. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2008;9(2):140–146. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2007.03.029>
22. Sujka M., Jamroz J. Ultrasound-treated starch: SEM and TEM imaging, and functional behaviour. *Food Hydrocolloids*. 2013;31(2):413–419. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2012.11.027>
23. Chen Y., Truong V.N.T., Bu X., Xie G. A review of effects and applications of ultrasound in mineral flotation. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2020;60:104739. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104739>
24. Poilov V.Z., Burov V.E., Gallyamov A.N., Fedotova O.A. Sonochemical activation of amine hydrochloric acid solution used as a collector in sylvinitic ore flotation. *Obogashchenie Rud*. 2021;(5):15–26. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/or.2021.05.04>
25. Burov V.E., Gallyamov A.N., Fedotova O.A., Poilov V.Z. The ultrasonic treatment influence on pH solution of hydrochloric amine. In: *All-Russian Scientific and Practical Conference "Chemistry. Ecology. Urbanistics"*. 2021. Vol. 2. Pp. 224–227. URL: https://ceu.pstu.ru/wp-content/uploads/2021/06/Himiyaekologiyaurbanistika_Tom-2.pdf
26. Liu H., Du Y.M., Kennedy J.F. Hydration energy of the 1,4-bonds of chitosan and their breakdown by ultrasonic treatment. *Carbohydrate Polymers*. 2007;68(3):598–600. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2006.11.004>
27. Liu P., Wang R., Kang X. et al. Effects of ultrasonic treatment on amylose-lipid complex formation and properties of sweet potato starch-based films. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2018;44:215–222. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.02.029>
28. Savitri E., Juliastuti S.R., Handaratri A. et al. Degradation of chitosan by sonication in very-low-concentration acetic acid. *Polymer Degradation and Stability*. 2014;110:344–352. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2014.09.010>
29. Wu Z., Qiao D., Zhao S. et al. Nonthermal physical modification of starch: An overview of recent research into structure and property alterations. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2022;203:153–175. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.01.103>
30. Huang J., Wang Z., Fan L., Ma S. A review of wheat starch analyses: Methods, techniques, structure and function. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2022;203:130–142. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.01.149>
31. Titkov S.N. Activation of the action of cationic collecting reagents. *Journal of Mining Institute*. 2005;165:191–195. (In Russ.) URL: <https://pmi.spmi.ru/index.php/pmi/article/view/8289>
32. Bocharov V.A., Khachatryan L.S., Ignatkina V.A., Baatarhuu J. On the selection of copper-molybdenum sulfide concentrate division methods with the use of high molecular weight organic depressors. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2007;(8):235–242. (In Russ.)



33. Shen H., Guo Y., Zhao J. et al. The multi-scale structure and physicochemical properties of mung bean starch modified by ultrasound combined with plasma treatment. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2021;191:821–831. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.09.157>
34. Osipovich A.E., Vakhrushev V.V., Kazantsev A.L. et al. Ultrasonic treatment influence on aqueous emulsion of amine hydrochloride. *Vestnik of Perm National Research Polytechnic University. Chemical Technology and Biotechnology*. 2014;(3):89–96. (In Russ.) URL: https://vestnik.pstu.ru/biohim/archives/?id=&folder_id=4235
35. Xu M., Xing Y., Gui X., Cao Y., Wang D., Wang L. Effect of ultrasonic pretreatment on oxidized coal flotation. *Energy Fuels*. 2017;31(12):14367–73. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.7b02115>
36. Deb Barma S., Sathish R., Baskey P.K., Biswal S.K. Chemical beneficiation of high-ash indian noncoking coal by alkali leaching under low-frequency ultrasonication. *Energy Fuels*. 2018;32(2):1309–1319. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.7b03291>
37. Barma S.D. Ultrasonic-assisted coal beneficiation: a review. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2019;50:15–35. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.08.016>

Информация об авторах

Владимир Евгеньевич Буров – аспирант кафедры «Химические технологии», Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Российская Федерация; ORCID [0000-0003-0369-0492](https://orcid.org/0000-0003-0369-0492), Scopus ID [57370843500](https://scopus.com/authorid/57370843500), SPIN-код [6897-4317](https://spinerussia.com/authorid/6897-4317); e-mail vladimire.burov@gmail.com

Владимир Зотович Пойлов – доктор технических наук, профессор кафедры «Химические технологии», Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Российская Федерация; Scopus ID [10043355200](https://scopus.com/authorid/10043355200); e-mail vladimirpoilov@mail.ru

Чжицян Хуан – PhD, профессор, Школа ресурсного и экологического инжиниринга, Университет науки и технологии Цзянси, г.о. Ганьчжоу, Китай; ORCID [0000-0002-5562-8407](https://orcid.org/0000-0002-5562-8407), Scopus ID [35205081500](https://scopus.com/authorid/35205081500); e-mail zhiquang@jxust.edu.cn

Алексей Владимирович Чернышев – аспирант кафедры «Химические технологии», Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Российская Федерация; e-mail AlexCher-1997@yandex.ru

Константин Геннадьевич Кузьминых – старший преподаватель кафедры «Химические технологии», Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Российская Федерация; Scopus ID [57211144529](https://scopus.com/authorid/57211144529); e-mail kgkuz@mail.ru

Information about the authors

Vladimir E. Burov – PhD-Student, Department of Chemical Technology, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation; ORCID [0000-0003-0369-0492](https://orcid.org/0000-0003-0369-0492), Scopus ID [57370843500](https://scopus.com/authorid/57370843500), SPIN-code [6897-4317](https://spinerussia.com/authorid/6897-4317); e-mail vladimire.burov@gmail.com

Vladimir Z. Poilov – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Chemical Technology, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation; Scopus ID [10043355200](https://scopus.com/authorid/10043355200); e-mail vladimirpoilov@mail.ru

Zhiqiang Huang – PhD, Professor, School of Resource and Environment Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou, China; ORCID [0000-0002-5562-8407](https://orcid.org/0000-0002-5562-8407), Scopus ID [35205081500](https://scopus.com/authorid/35205081500); e-mail zhiquang@jxust.edu.cn

Alexey V. Chernyshev – PhD-Student, Department of Chemical Technology, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation; e-mail AlexCher-1997@yandex.ru

Konstantin G. Kuzminykh – Senior Lecturer, Department of Chemical Technology, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation; Scopus ID [57211144529](https://scopus.com/authorid/57211144529); e-mail kgkuz@mail.ru

Поступила в редакцию	09.08.2022	Received	09.08.2022
Поступила после рецензирования	19.09.2022	Revised	19.09.2022
Принята к публикации	23.09.2022	Accepted	23.09.2022



ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ В МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОМ КОМПЛЕКСЕ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-08-18>

УДК 622.4:622.8



Аэрологические риски высших рангов в угольных шахтах

С. В. Баловцев   

Университет науки и технологий МИСИС, г. Москва, Российская Федерация

 balovcev@yandex.ru

Аннотация

Устойчивая тенденция перехода к осложнению горно-геологических факторов при подземной добыче угля и одновременно при этом процессы повышения интенсификации горных работ вызывают рост динамических проявлений природных факторов горного производства, таких как внезапные выбросы угля и газа, горные удары, обрушения пород, приводящие к взрывам газа и пыли, пожарам. Это приводит к необходимости разрабатывать модели рисков проявления разных явлений, что позволяет повысить технологическую безопасность горного предприятия. В представленном исследовании на основе методологии оценки аэрологических рисков в угольных шахтах проведен структурный анализ аэрологических рисков. Сформированы критерии опасности горно-геологических и горнотехнических факторов и уязвимости схем и способов вентиляции, а также вентиляционных сооружений и вентиляторов главного проветривания. Разработана иерархическая структура аэрологических рисков высших рангов. Представленная структура рисков позволяет для каждой шахты и отдельных ее объектов определить область пересечения опасных факторов угледобычи и уязвимости систем вентиляции, а также количественно оценить эти области в виде аэрологических рисков. Установлены диапазоны значений аэрологического риска высших рангов для сверхкатегорийных шахт и шахт, опасных по внезапным выбросам угля и газа, для разных вентиляционных режимов. Представленная методология позволяет осуществлять прогнозирование и снижение аэрологических рисков при проектировании, эксплуатации, ликвидации и консервации угольных шахт.

Ключевые слова

угольная шахта, методология обеспечения аэрологической безопасности, иерархическая структура рисков, ранги аэрологических рисков, метан, угольная пыль, критерии опасности, уязвимость схем вентиляции

Для цитирования

Balovtsev S.V. Higher rank aerological risks in coal mines. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2022;7(4):310–319. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-08-18>

SAFETY IN MINING AND PROCESSING INDUSTRY AND ENVIRONMENTAL PROTECTION

Research paper

Higher rank aerological risks in coal mines

S. V. Balovtsev   

National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation

 balovcev@yandex.ru

Abstract

The steady trend of complication of mining and geological factors in underground coal mining and at the same time the processes of mining intensification cause growth of dynamic manifestations of natural factors of mining, such as sudden coal and gas outbursts, rock bursts, rock collapses, leading to gas and dust explosions and fires. This requires developing the models of different phenomena manifestation risks, which enable improving the process safety of a mining enterprise. In this study, based on the methodology of aerological risk assessment in coal mines, a structural analysis of aerological risks was carried out. The criteria of hazard of mining-geological and mine engineering factors and vulnerability of schemes and methods of ventilation, ventilation facilities, and main fans were developed. A hierarchical structure of aerological risks of higher ranks was developed. The presented risk structure allows determining the area of superposition of hazards of coal mining and vulnerability of ventilation systems for each mine and its individual facilities, as well as



quantifying these areas in the form of aerological risks. The ranges of aerological risk values of higher ranks for super-category mines and mines hazardous by sudden coal and gas outbursts for different ventilation modes were established. The presented methodology enables forecasting and reducing aerological risks in course of designing, operation, liquidation, and conservation of coal mines.

Keywords

coal mine, aerological safety methodology, hierarchical risk structure, aerological risk ranks, methane, coal dust, hazard criteria, vulnerability of ventilation systems

For citation

Balovtsev S.V. Higher rank aerological risks in coal mines. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2022;7(4):310–319. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-08-18>

Введение

Проблема обеспечения аэрологической безопасности угольных шахт носит комплексный, системный характер, решение которой связано с эффективностью реализации на практике взаимосвязанного комплекса технических, технологических, инженерных и информационных систем, производственных мероприятий и персонала, направленных на снижение не только уровня аэрологического риска, но и других видов риска, таких как геотехнические, геомеханические, гидрогеологические, организационно-технические [1–3].

Основными опасностями в угольных шахтах являются пылевая и газовая, они приводят к наиболее тяжелым видам аварий – взрывам газа и пыли, пожарам [4, 5]. В последние годы в Российской Федерации и за рубежом ведутся интенсивные поиски новых, более эффективных средств и способов взрывозащиты горных выработок, отвечающих современным требованиям и техническим возможностям [6–8].

В результате этих исследований с помощью численного моделирования более глубоко изучены следующие направления:

- распределение метана в зонах интенсивного ведения горных работ в угольных шахтах [9–11];
- свойства многокомпонентных взрывоопасных газоздушных смесей в шахтной атмосфере [12];
- процессы осаждения угольной пыли в горных выработках [13, 14].

В современных условиях высоких нагрузок на очистные забои для обеспечения безопасности высокопроизводительных лав проводится интенсивная внутрипластовая дегазация шахт на примере шахты им. С.М. Кирова (Ленинск-Кузнецкий) [15]. В работах [16, 17] представлены успешные решения по дегазации выемочных полей шахт и снижения пылеобразования в лавах.

В условиях разработки высокогазоносных угольных пластов, опасных по пылевому фактору, обеспечить аэрологическую безопасность без применения дегазации и технологий обеспыливания угольных пластов невозможно [18, 19]. Однако основным средством борьбы с газовой и пылевой опасностью в угольных шахтах по-прежнему остается вентиляция. При внезапной остановке вентилятора главного проветривания в газовых шахтах, если невозможно включить резервный вентилятор, необходимо прекратить все работы на участках, снять напряжение с электрооборудования, вывести по истечении 30 мин всех людей

к воздухоподающему стволу, а при неисправностях, для устранения которых требуется много времени, вывести людей на поверхность. Поэтому для эффективного выбора схем воздухообеспечения в угольных шахтах вопросы оценки и анализа аэродинамических параметров воздушных потоков требуют постоянного исследования [20–22]. Необходимо проводить расчет устойчивости воздушных потоков в горных выработках по количественным параметрам, направлениям проветривания, фактору тепловой депрессии [23]. Аспекты аэрологической безопасности, основанные на количественных оценках рисков аварий, находят свои приложения в реализации проектов цифровой трансформации и интеллектуализации горнотехнических систем [24, 25]. Это, в свою очередь, определяет перспективные направления развития технологической структуры угольных шахт [26, 27], позволяет разрабатывать эволюционные модели системы безопасности угольных шахт на основе многофакторного моделирования, в том числе с использованием интеллектуальных алгоритмов и методов [28, 29].

Методология оценки аэрологических рисков

Для успешного решения множества проектных и производственных вопросов, связанных с обеспечением аэрологической безопасности угольных шахт на должном уровне, необходимы анализ и обработка больших потоков структурированной информации, взаимоувязанных между собой иерархически и представляющих собой некую информационную архитектуру аэрологической безопасности. Для этой архитектуры должны быть прописаны критерии опасности для системы в целом и уязвимости ее элементов, в соответствии с которыми разрабатываются инженерно-технические решения по предотвращению воздействия опасных горно-геологических и горнотехнических факторов угледобычи. Конечной целью построения архитектуры аэрологической безопасности являются количественная оценка аэрологической безопасности и определение путей ее совершенствования.

Одной из количественных характеристик аэрологической безопасности являются аэрологические риски, которые выражают вероятностную меру опасности возникновения аварий из-за неудовлетворительного состава шахтной атмосферы, реализуемых для схем вентиляции определенной уязвимости. В результате проведенных исследований были сформированы критерии опасности и уязвимости в структуре



аэрологических рисков, охватывающих всю архитектуру аэрологической безопасности. Это дало возможность объединить все проведенные исследования и количественно оценить как аэрологическую безопасность шахты в целом, так и отдельные ее элементы.

Иерархическая структура аэрологических рисков создавалась от частного к общему по принципу «снизу вверх» от отдельных объектов шахты до шахты в целом. Для этого вся шахта была поделена на три области по уровню функционирования ее объектов. Сначала была разработана концепция аэрологических рисков для выемочных участков и подготовительных выработок, которые в системе рангов заняли нижнее положение и стали определяться как риски III ранга. Аэрологические риски отказов, которые могут привести к авариям в пределах крыльев шахт, заняли среднее положение в структуре рангов и стали определяться как риски II ранга. Аэрологические риски отказов, которые могут привести к авариям для всей шахты, заняли высшее положение в структуре рангов и стали определяться как риски I ранга.

Аэрологические риски III ранга исследованы в более ранних работах автора, в результате этих исследований были разработаны:

- иерархическая структура рисков этого ранга;
- критерии опасности факторов и уязвимости схем вентиляции на уровне участков и подготовительных выработок;
- методики оценки аэрологических рисков для выемочных участков и для подготовительных выработок;
- методика расчета прогнозируемых значений риска при использовании мероприятий по управлению газовой выделением с помощью дегазации высокогазонасыщенных угольных пластов, опасных по взрывам пыли;
- а также:
- получено количественное сравнение рисков загазирования выработок при различных схемах вентиляции; оценено влияние аэродинамического старения выработок на риски участковых и капитальных горных выработок с различными способами их охраны;
- выполнены расчеты значений аэрологических рисков III ранга для ряда шахт Кузнецкого бассейна.

Поскольку структура рисков III ранга уже приведена в предыдущих публикациях автора, то необходимо более подробно остановиться на структуре рисков I и II рангов.

Показатели опасности и уязвимости в структуре рисков I и II рангов

Принципиальная схема построения структур всех рангов одинакова, используется почти один и тот же набор опасных факторов горного производства, но области воздействия этих факторов на каждом уровне разные. Это делает необходимым устанавливать разные виды и уровни уязвимости вентиляции и, соответственно, разные уровни негативных последствий отказов вентиляции. Основными показателями опасности в структуре аэрологических рисков всех рангов являются газовая и пылевая, а также температура горных пород. Оценка взрывоопасности угольных шахт включает оценку взрывчатых свойств многокомпо-

нентных газопылевоздушных смесей, содержащих тяжелые углеводороды в шахтной атмосфере. Для оценки рисков II ранга выбирается самый опасный пласт крыла шахты, для рисков I ранга – самый опасный пласт шахты.

Аэрологический риск I ранга $R_{\text{аш}}$ рассчитывается по формуле

$$R_{\text{аш}} = \lambda_{\text{ш}} v_{\text{ш}}, \quad (1)$$

где $\lambda_{\text{ш}}$ – коэффициент опасности возникновения аварии для шахты; $v_{\text{ш}}$ – коэффициент уязвимости вентиляции шахты;

$$\lambda_{\text{ш}} = (\delta_{\text{пш}} q_{\text{пш}} + \delta_{\text{гш}} q_{\text{гш}}) \lambda_0, \quad (2)$$

где $\delta_{\text{пш}}$ – коэффициент значимости пылевого фактора для шахты; $q_{\text{пш}}$ – значение кода показателя опасности шахтопластов по удельному пылевыведению; $\delta_{\text{гш}}$ – коэффициент значимости газового фактора для шахты; $q_{\text{гш}}$ – значение кода показателя опасности шахты по относительной газообильности; λ_0 – нормирующий множитель;

$$v_{\text{ш}} = (\varphi_{\text{св}} \alpha_{\text{св}} + \varphi_{\text{сп}} \alpha_{\text{сп}} + \varphi_{\text{вгп}} \alpha_{\text{вгп}}) v_0, \quad (3)$$

где $\varphi_{\text{св}}$ – коэффициент значимости уязвимости схемы вентиляции шахты; $\alpha_{\text{св}}$ – значение кода уязвимости схемы вентиляции шахты; $\varphi_{\text{сп}}$ – коэффициент значимости уязвимости способа вентиляции шахты; $\alpha_{\text{сп}}$ – значение кода уязвимости способа вентиляции шахты; $\varphi_{\text{вгп}}$ – коэффициент значимости уязвимости вентиляторов главного проветривания шахты; $\alpha_{\text{вгп}}$ – значение кода уязвимости вентиляторов главного проветривания шахты; v_0 – нормирующий множитель.

Раскладывая значения показателей в формуле (3), имеем:

$$\varphi_{\text{св}} = (\varphi_{\text{свд}} \alpha_{\text{свд}} + \varphi_{\text{свн}} \alpha_{\text{свн}} + \varphi_{\text{сву}} \alpha_{\text{сву}}) v_1, \quad (4)$$

где $\varphi_{\text{свд}}$ – коэффициент значимости влияния величины депрессии шахты на уязвимость схемы вентиляции шахты; $\alpha_{\text{свд}}$ – значение кода уязвимости схемы вентиляции шахты в зависимости от величины ее депрессии; $\varphi_{\text{свн}}$ – коэффициент значимости степени влияния направления движения свежей и исходящих струй на утечки воздуха; $\alpha_{\text{свн}}$ – значение кода уязвимости схемы вентиляции шахты в зависимости от степени влияния направления движения свежей и исходящих струй на утечки воздуха; $\varphi_{\text{сву}}$ – коэффициент значимости влияния устойчивости проветривания на уязвимость схемы вентиляции шахты; $\alpha_{\text{сву}}$ – значение кода уязвимости схемы вентиляции в зависимости от устойчивости проветривания шахты; v_1 – нормирующий множитель;

$$\varphi_{\text{сп}} = \varphi_{\text{спз}} \alpha_{\text{спз}} v_2, \quad (5)$$

где $\varphi_{\text{спз}}$ – коэффициент значимости степени влияния способа вентиляции на загазирование выработок при внезапной остановке вентилятора главного проветривания; $\alpha_{\text{спз}}$ – значение кода уязвимости степени влияния способа вентиляции на загазирование выработок при внезапной остановке вентилятора главного проветривания; v_2 – нормирующий множитель;

$$\varphi_{\text{вгп}} = (\varphi_{\text{вгпу}} \alpha_{\text{вгпу}} + \varphi_{\text{вгпо}} \alpha_{\text{вгпо}} + \varphi_{\text{вгпв}} \alpha_{\text{вгпв}}) v_3, \quad (6)$$



где $\varphi_{вгпу}$ – коэффициент значимости степени влияния устойчивости совместной работы вентиляторов главного проветривания; $\alpha_{вгпу}$ – значение кода степени влияния устойчивости совместной работы вентиляторов главного проветривания; $\varphi_{вгпо}$ – коэффициент значимости степени обеспеченности шахты воздухом; $\alpha_{вгпо}$ – значение кода значимости степени обеспеченности шахты воздухом; $\varphi_{вгпв}$ – коэффициент значимости величины внешних утечек воздуха; $\alpha_{вгпв}$ – значение кода значимости величины внешних утечек воздуха; v_3 – нормирующий множитель.

Представленные показатели опасности и уязвимости в структуре рисков I ранга иерархически увязаны в функциональную систему, отраженную на рис. 1.

Уязвимость вентиляции на уровне рисков I ранга включает: уязвимость схем и способов вентиляции шахт и уязвимость вентиляторов главного проветривания. Уязвимость схем вентиляции шахт определяется: величиной депрессии шахты, степенью влияния направления движения свежей и исходящей струй на утечки воздуха; устойчивостью проветривания шахты. Уязвимость способов вентиляции на уровне рисков I ранга включает: степень влияния способа вентиляции на загазирование выработок при остановке вентиляторов главного проветривания.

Уязвимость вентиляторов главного проветривания определяется: устойчивостью совместной работы вентиляторов главного проветривания, степенью обеспеченности шахты воздухом, величиной внешних утечек воздуха.

Уязвимость вентиляции на уровне рисков II ранга включает: уязвимость схем и способов вентиляции крыльев шахт и уязвимость вентиляционных сооружений. В свою очередь, уязвимость схем вентиляции крыльев шахты определяется: величиной депрессии откаточного и вентиляционного магистральных штреков, которая зависит от вида штрека (полевой, пластовой), способа охраны (целик-целик, целик-выработанное пространство, выработанное пространство-выработанное пространство); степенью влияния направления движения свежей и исходящей струй на утечки воздуха; устойчивостью проветривания крыла шахты; величиной тепловой депрессии наклонных выработок.

Уязвимость способов вентиляции на уровне рисков II ранга включает: степень влияния способа вентиляции на загазирование выработок при остановке вентиляторов главного проветривания. Уязвимость вентиляционных сооружений определяется степенью их влияния на устойчивость проветривания.

Аэрологический риск II ранга рассчитывается по формуле

$$R_{\alpha_{кш}} = \lambda_{кш} v_{кш}, \quad (7)$$

где $\lambda_{кш}$ – коэффициент опасности возникновения аварии для крыла шахты; $v_{кш}$ – коэффициент уязвимости вентиляции крыла шахты;

$$\lambda_{кш} = (\delta_{пкш} q_{пкш} + \delta_{гкш} q_{гкш}) \lambda_{0кш}, \quad (8)$$

где $\delta_{пкш}$ – коэффициент значимости пылевого фактора для крыла шахты; $q_{пкш}$ – значение кода показателя

опасности шахтопластов по удельному пылевыведению для крыла шахты; $\delta_{гкш}$ – коэффициент значимости газового фактора для крыла шахты; $q_{гкш}$ – значение кода показателя опасности шахты по относительной газообильности для крыла шахты; $\lambda_{0кш}$ – нормирующий множитель;

$$v_{кш} = (\varphi_{свк} \alpha_{свк} + \varphi_{спк} \alpha_{спк} + \varphi_{вск} \alpha_{вск}) v_{1к}, \quad (9)$$

где $\varphi_{свк}$ – коэффициент значимости уязвимости схемы вентиляции крыла шахты; $\alpha_{свк}$ – значение кода уязвимости схемы вентиляции крыла шахты; $\varphi_{спк}$ – коэффициент значимости уязвимости способа вентиляции шахты; $\alpha_{спк}$ – значение кода уязвимости способа вентиляции крыла шахты; $\varphi_{вск}$ – коэффициент значимости уязвимости вентиляционных сооружений крыла шахты; $\alpha_{вск}$ – значение кода уязвимости вентиляционных сооружений крыла шахты; $v_{1к}$ – нормирующий множитель.

Раскладывая значения показателей в формуле (9), имеем:

$$\varphi_{свк} = (\varphi_{свкд} \alpha_{свкд} + \varphi_{свкн} \alpha_{свкн} + \varphi_{свкк} \alpha_{свкк} + \varphi_{свкк} \alpha_{свкк}) v_{2к}, \quad (10)$$

где $\varphi_{свкд}$ – коэффициент значимости влияния величины депрессии откаточного и вентиляционного магистральных штреков; $\alpha_{свкд}$ – значение кода уязвимости схемы вентиляции крыла шахты в зависимости от величины депрессии откаточного и вентиляционного магистральных штреков; $\varphi_{свкн}$ – коэффициент значимости степени влияния направления движения свежей и исходящих струй на утечки воздуха; $\alpha_{свкн}$ – значение кода уязвимости схемы вентиляции шахты в зависимости от степени влияния направления движения свежей и исходящих струй на утечки воздуха; $\varphi_{свкк}$ – коэффициент значимости влияния устойчивости проветривания на уязвимость схемы вентиляции крыла шахты; $\alpha_{свкк}$ – значение кода уязвимости схемы вентиляции крыла шахты в зависимости от устойчивости проветривания; $\varphi_{свкт}$ – коэффициент значимости величины тепловой депрессии наклонных выработок; $\alpha_{свкт}$ – значение кода значимости величины тепловой депрессии наклонных выработок; $v_{2к}$ – нормирующий множитель;

$$\varphi_{спк} = \varphi_{спзк} \alpha_{спзк} v_{3к}, \quad (11)$$

где $\varphi_{спзк}$ – коэффициент значимости степени влияния способа вентиляции крыла шахты на загазирование выработок при внезапной остановке вентилятора главного проветривания; $\alpha_{спзк}$ – значение кода уязвимости степени влияния способа вентиляции крыла шахты на загазирование выработок при внезапной остановке вентилятора главного проветривания; $v_{3к}$ – нормирующий множитель;

$$\varphi_{вск} = \varphi_{вск} \alpha_{вск} v_{4к}, \quad (12)$$

где $\varphi_{вск}$ – коэффициент значимости степени влияния вентиляционных сооружений на устойчивость проветривания; $\alpha_{вск}$ – значение кода степени влияния вентиляционных сооружений на устойчивость проветривания; $v_{4к}$ – нормирующий множитель.

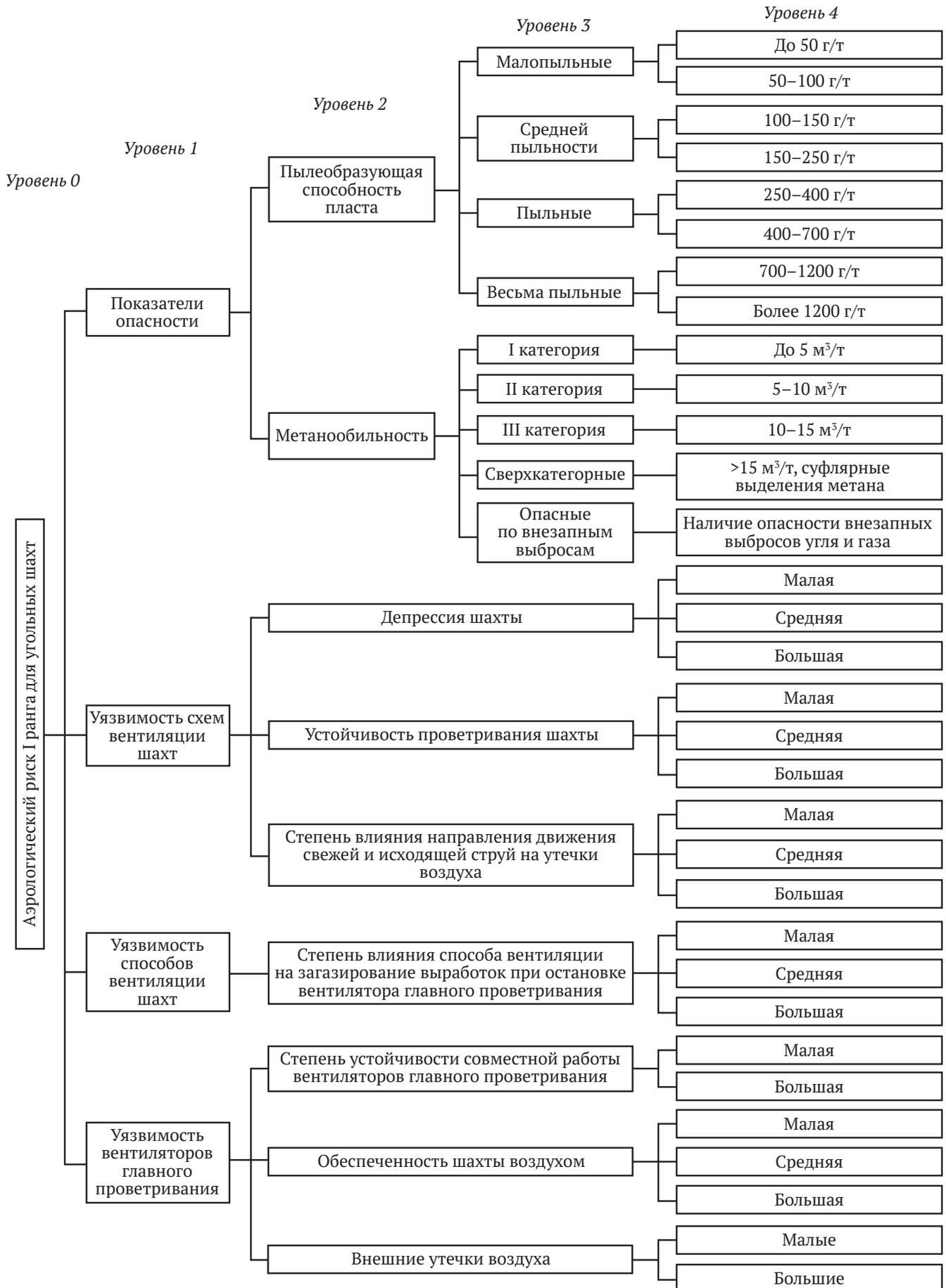


Рис. 1. Иерархическая структура аэрологического риска I ранга

Представленные показатели опасности и уязвимости в структуре рисков II ранга иерархически представлены в виде функциональной схемы, отраженной на рис. 2.

Таким образом, представленная методология конструирования архитектуры аэрологической безопасности, включающая оценки аэрологических рисков, позволяет количественно оценить эффективность различных способов совершенствования шахтной вентиляции.

Результаты исследований

За основу количественной оценки опасности, уязвимости, аэрологического риска принят известный подход получения нормирующих коэффициентов, характеризующих долю уязвимости (аэрологического риска) схем и способов вентиляции шахты (крыла шахты) от наиболее неблагоприятной ситуации, принимаемой за единицу. Для шахты это центрально-сдвоенная схема вентиляции, нагнетательный способ проветривания, усугубляющиеся неблагоприятными условиями: схемы

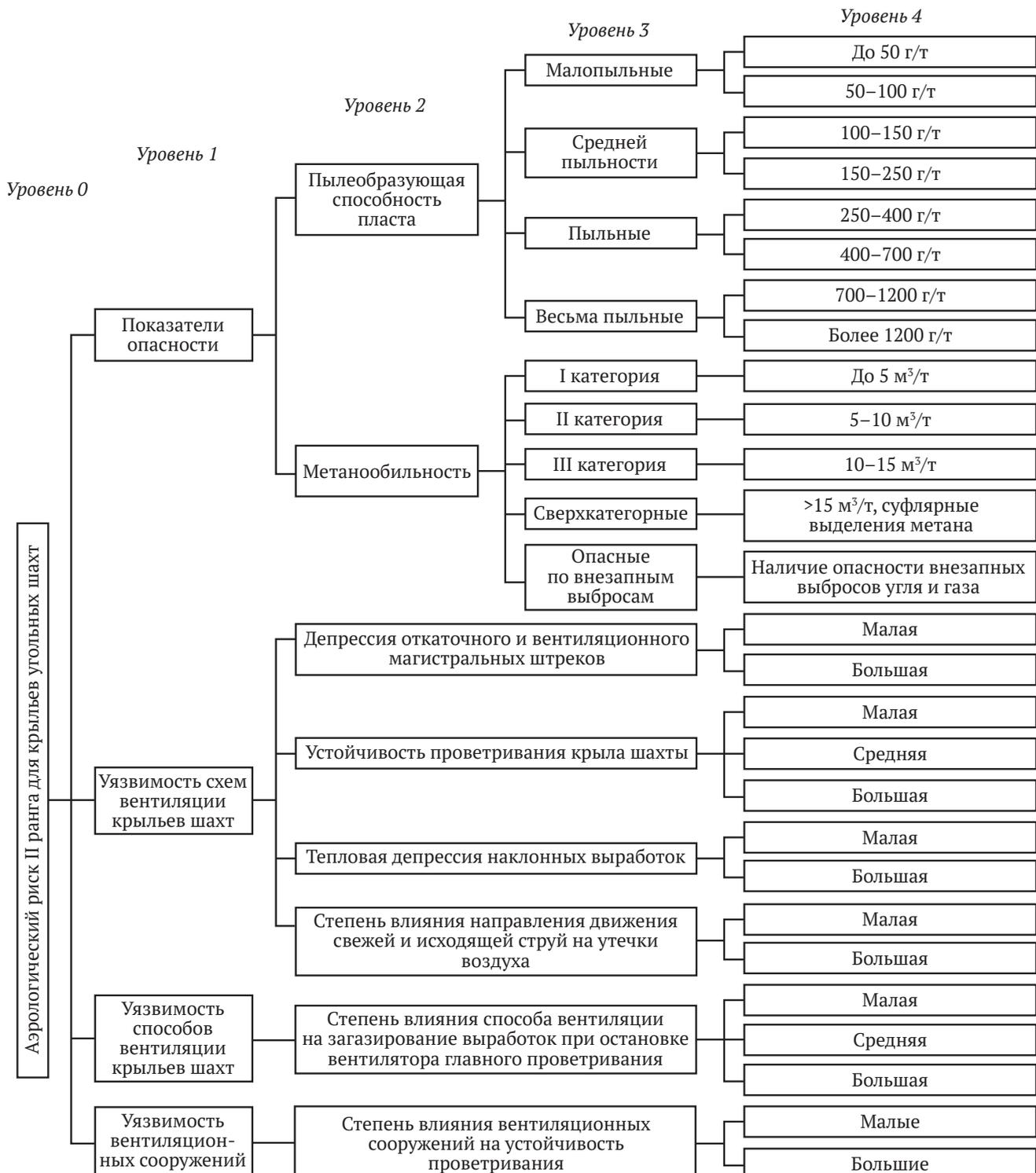


Рис. 2. Иерархическая структура аэрологического риска II ранга



с низкой степенью устойчивости (опрокидывание вентиляционной струи происходит при нормальной работе шахты – 3-я категория устойчивости), большая депрессия шахты, большая степень влияния направления движения свежей и исходящей струй на утечки воздуха; большая степень влияния способа вентиляции на загазирование выработок при остановке вентиляторов главного проветривания, низкая обеспеченность шахты воздухом, большие внешние утечки и др.

В табл. 1 приведены диапазоны значений аэрологического риска I ранга для сверхкатегорийных шахт и шахт, опасных по внезапным выбросам угля и газа, для разных вентиляционных режимов. Первая цифра диапазона значений риска отражает самые благоприятные условия: наименьшее пылевыведение, отсутствие диагоналей в вентиляционной сети, прямоочная схема движения воздуха, малая депрессия шахты,

устойчивая совместная работа вентиляторов главного проветривания, наличие резерва шахты по воздуху, малые внешние утечки и т.п.

Анализ расчетных данных показывает, что, если риски для различных схем и способов вентиляции возрастают от лучших к худшим условиям в 2,1 раза (0,152/0,078), то от значений вентиляционных параметров величина риска зависит в большей степени и составляет его увеличение в 6,8 раза (0,535/0,078). Аналогичная зависимость прослеживается и для рисков II ранга (табл. 2).

Необходимо отметить, что методология позволяет выделить из структуры рисков наиболее значимые элементы (вентиляционные показатели) и разработать инженерно-технические мероприятия по снижению аэрологических рисков и повышению эффективности аэрологической безопасности.

Таблица 1

Значения аэрологического риска I ранга для сверхкатегорийных шахт и шахт, опасных по внезапным выбросам угля и газа

Схема и способ проветривания	Значения аэрологического риска I ранга		
	1-я категория устойчивости	2-я категория устойчивости	3-я категория устойчивости
Фланговая схема, всасывающий способ	0,078–0,535	0,101–0,575	0,203–0,733
	0,093–0,611	0,121–0,657	0,242–0,838
Фланговая схема, комбинированный способ	0,083–0,545	0,105–0,595	0,224–0,756
	0,098–0,623	0,125–0,68	0,267–0,864
Фланговая схема, нагнетательный способ	0,087–0,556	0,108–0,615	0,245–0,78
	0,104–0,635	0,129–0,703	0,292–0,891
Комбинированная схема, всасывающий способ	0,088–0,571	0,109–0,647	0,237–0,786
	0,105–0,653	0,129–0,739	0,282–0,898
Комбинированная схема, комбинированный способ	0,1–0,599	0,133–0,685	0,262–0,808
	0,119–0,685	0,159–0,783	0,313–0,923
Комбинированная схема, нагнетательный способ	0,111–0,627	0,159–0,724	0,288–0,83
	0,133–0,717	0,189–0,827	0,344–0,948
Центрально-сдвоенная схема, всасывающий способ	0,105–0,614	0,179–0,715	0,3–0,832
	0,126–0,702	0,213–0,817	0,357–0,951
Центрально-сдвоенная схема, комбинированный способ	0,129–0,635	0,198–0,74	0,312–0,853
	0,154–0,726	0,236–0,846	0,372–0,975
Центрально-сдвоенная схема, нагнетательный способ	0,152–0,656	0,217–0,766	0,325–0,875
	0,182–0,75	0,259–0,875	0,388–1,000

Примечание. В числителе приведены значения риска для сверхкатегорийных шахт, в знаменателе – для шахт, опасных по внезапным выбросам угля и газа.

Таблица 2

Значения аэрологического риска II ранга для сверхкатегорийных шахт и шахт, опасных по внезапным выбросам угля и газа

Схема и способ проветривания	Значения аэрологического риска II ранга		
	1-я категория устойчивости	2-я категория устойчивости	3-я категория устойчивости
Фланговая схема, всасывающий способ	0,078–0,429	0,127–0,543	0,244–0,659
	0,093–0,49	0,151–0,621	0,291–0,753
Фланговая схема, комбинированный способ	0,088–0,48	0,141–0,589	0,258–0,707
	0,105–0,548	0,168–0,673	0,308–0,808
Фланговая схема, нагнетательный способ	0,098–0,531	0,155–0,635	0,273–0,755
	0,117–0,607	0,185–0,725	0,326–0,863
Центрально-сдвоенная схема, всасывающий способ	0,093–0,514	0,146–0,607	0,252–0,719
	0,111–0,587	0,174–0,694	0,301–0,821
Центрально-сдвоенная схема, комбинированный способ	0,108–0,586	0,167–0,678	0,278–0,797
	0,128–0,670	0,199–0,775	0,332–0,911
Центрально-сдвоенная схема, нагнетательный способ	0,122–0,658	0,188–0,749	0,304–0,875
	0,145–0,752	0,224–0,856	0,362–1,000

Примечание. В числителе приведены значения риска для сверхкатегорийных шахт, в знаменателе – для шахт, опасных по внезапным выбросам угля и газа.



Заключение

Устойчивая тенденция перехода условий угледобычи к осложнению горно-геологических факторов, связанных с ростом глубины горных работ и температуры горных пород, а также одновременная при этом интенсификация горных работ с помощью современного высокопроизводительного оборудования вызывают рост динамических проявлений природных факторов горного производства, таких как внезапные выбросы угля и газа, горные удары, обрушения пород, приводящие к взрывам газа и пыли, пожарам. Это предьявляет дополнительные требования к формированию и функционированию архитектуры аэрологической безопасности угольных шахт, проявляющиеся в необходимости целостности оценки рисков как для шахты, так и для ее объектов, а следовательно, выте-

кающих из этого – гибкости, оперативности и взаимосвязанности принимаемых организационно-технических и технологических решений, возможности снижения уровня аэрологических рисков.

Таким требованиям обеспечения аэрологической безопасности отвечает иерархическая структура аэрологических рисков угольных шахт, которая позволяет для каждой шахты и отдельных ее объектов определить область пересечения опасных факторов угледобычи и уязвимости схем и способов вентиляции, а также вентиляционных сооружений и оценить количественно эти области в виде аэрологических рисков. Представленная методология позволяет осуществлять прогнозирование и снижение аэрологических рисков при проектировании, эксплуатации, ликвидации и консервации угольных шахт.

Список литературы

1. 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>
2. 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>
3. Qiao W. Analysis and measurement of multifactor risk in underground coal mine accidents based on coupling theory. *Reliability Engineering & System Safety*. 2021;208:107433. <https://doi.org/10.1016/j.res.2021.107433>
4. Kabanov E. I., Korshunov G. I., Magomet R. D. Quantitative risk assessment of miners injury during explosions of methane-dust-air mixtures in underground workings. *Journal of Applied Science and Engineering*. 2020;24(1):105–110. [https://doi.org/10.6180/jase.202102_24\(1\).0014](https://doi.org/10.6180/jase.202102_24(1).0014)
5. Trinh L. H., Nguyen V. N. Mapping coal fires using Normalized Difference Coal Fire Index (NDCF): case study at Khanh Hoa coal mine, Vietnam. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021;6(4):233–240. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-4-233-240>
6. Забурдяев В. С. Прогноз и предотвращение рисков формирования взрывоопасных смесей в угольных шахтах. *Безопасность труда в промышленности*. 2019;(6):65–69. <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2019-6-65-69>
7. Shi L., Wang J., Zhang G. et al. A risk assessment method to quantitatively investigate the methane explosion in underground coal mine. *Process Safety and Environmental Protection*. 2017;107:317–333. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2017.02.023>
8. Dmitrievich M. R., Alekseevich R. V., Borisovich S. V. Methodological approach to issue of researching dust-explosion protection of mine workings of coal mines. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2019;10(2):1154–1161.
9. Hasheminasab F., Bagherpour R., Aminossadati S. M. Numerical simulation of methane distribution in development zones of underground coal mines equipped with auxiliary ventilation. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2019;89:68–77. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.03.022>
10. Yuez L., Akhtar S., Sasmito A. P., Kurnia J. C. Prediction of air flow, methane, and coal dust dispersion in a room and pillar mining face. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2017;27(4):657–662. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2017.05.019>
11. Lolon S. A., Brune J. F., Bogin G. E., Juganda A. Study of methane outgassing and mitigation in longwall coal mines. *Mining, Metallurgy and Exploration*. 2020;37(5):1437–1449. <https://doi.org/10.1007/s42461-020-00287-6>
12. Лебедев В. С., Скопинцева О. В. Остаточные газовые компоненты угольных пластов: состав, содержание, потенциальная опасность. *Горный журнал*. 2017;(4):84–86. <https://doi.org/10.17580/gzh.2017.04.17>
13. Филин А. Э., Курносов И. Ю., Колесникова Л. А. и др. К вопросу моделирования процесса осаждения пыли для условий угольной шахты. *Уголь*. 2022;(9):67–72. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2022-9-67-72>
14. Smirnyakov V. V., Smirnyakova V. V., Pekarchuk D. S., Orlov F. A. Analysis of methane and dust explosions in modern coal mines in Russia. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2019;10(2):1917–1929.
15. Slastunov S., Kolikov K., Batugin A. et al. Improvement of intensive in-seam gas drainage technology at Kirova Mine in Kuznetsk Coal Basin. *Energies*. 2022;15(3):1047. <https://doi.org/10.3390/en15031047>
16. Шулятьева Л. И., Майорова Л. В. Моделирование параметров и организация процесса дегазации выемочных полей угольных шахт. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022;(8):168–179. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_8_0_168
17. Kornev A. V., Korshunov G. I., Kudelas D. Reduction of dust in the longwall faces of coal mines: Problems and perspective solutions. *Acta Montanistica Slovaca*. 2021;26(1):84–97. <https://doi.org/10.46544/AMS.v26i1.07>



18. Скопинцева О.В., Ганова С.Д., Демин Н.В., Папичев В.И. Комплексный метод снижения пылевой и газовой опасностей в угольных шахтах. *Горный журнал*. 2018;(11):97–100. <https://doi.org/10.17580/gzh.2018.11.18>
19. Скопинцева О.В., Вертинский А.С., Иляхин С.В. и др. Обоснование рациональных параметров обеспыливающей обработки угольного массива в шахтах. *Горный журнал*. 2014;(5):17–20.
20. Босиков И.И., Ключев Р.В., Аймбетова И.О., Махошева С.А. Оценка и анализ аэродинамических параметров воздушных потоков для эффективного выбора схем воздухообеспечения в угольных шахтах. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2021;13(3):397–405. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2021-13-3-397-405>
21. Yi H., Park J., Kim M.S. Characteristics of mine ventilation air flow using both blowing and exhaust ducts at the mining face. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2020;34:1167–1174. <https://doi.org/10.1007/s12206-020-0218-0>
22. Li Y., Su H., Ji H., Cheng W. Numerical simulation to determine the gas explosion risk in longwall goaf areas: A case study of Xutuan Colliery. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2020;30(6):875–882. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2020.07.007>
23. Попов М.Д., Кормщиков Д.С., Семин М.А., Левин Л.Ю. Расчет устойчивости воздушных потоков в горных выработках по фактору тепловой депрессии в аналитическом комплексе «Аэросеть». *Безопасность труда в промышленности*. 2020;(10):24–32. <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2020-10-24-32>
24. Тарасенко И.А., Куликова А.А., Ковалева А.М. К вопросу оценки автоматизации контроля параметров метановоздушной смеси. *Уголь*. 2022;(11):84–88. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2022-11-84-88>
25. Куликова Е.Ю., Конюхов Д.С. Мониторинг риска аварий при освоении подземного пространства. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022;(1):97–103. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_1_0_97
26. Захаров В.Н., Кубрин С.С. Цифровая трансформация и интеллектуализация горнотехнических систем. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022;(5–2):31–47. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_52_0_31
27. Казанин О.И., Мешков А.А., Сидоренко А.А. Перспективные направления развития технологической структуры угольных шахт. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022;(6–1):35–53. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_61_0_35
28. Cheng L., Guo H., Lin H. Evolutionary model of coal mine safety system based on multi-agent modeling. *Process Safety and Environmental Protection*. 2021;147:1193–1200. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.01.046>
29. Nguyen Q.L., Nguyen Q.M., Tran D.T., Bui X.N. Prediction of ground subsidence due to underground mining through time using multilayer feed-forward artificial neural networks and back-propagation algorithm – case study at Mong Duong underground coal mine (Vietnam). *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021;6(4):241–251. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-4-241-251>

References

1. 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>
2. Kulikova E. Yu. Methods of forming an integral risk assessment in mine and underground construction. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2021;(2–1):124–133. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2021-21-0-124-133>
3. Qiao W. Analysis and measurement of multifactor risk in underground coal mine accidents based on coupling theory. *Reliability Engineering & System Safety*. 2021;208:107433. <https://doi.org/10.1016/j.res.2021.107433>
4. Kabanov E.I., Korshunov G.I., Magomet R.D. Quantitative risk assessment of miners injury during explosions of methane-dust-air mixtures in underground workings. *Journal of Applied Science and Engineering*. 2020;24(1):105–110. [https://doi.org/10.6180/jase.202102_24\(1\).0014](https://doi.org/10.6180/jase.202102_24(1).0014)
5. Trinh L.H., Nguyen V.N. Mapping coal fires using Normalized Difference Coal Fire Index (NDCFI): case study at Khanh Hoa coal mine, Vietnam. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021;6(4):233–240. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-4-233-240>
6. Zaburdayev V.S. Forecast and prevention of risks of explosive mixtures formation in the coal mines. *Occupational Safety in Industry*. 2019;(6):65–69. (In Russ.) <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2019-6-65-69>
7. Shi L., Wang J., Zhang G. et al. A risk assessment method to quantitatively investigate the methane explosion in underground coal mine. *Process Safety and Environmental Protection*. 2017;107:317–333. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2017.02.023>
8. Dmitrievich M.R., Alekseevich R.V., Borisovich S.V. Methodological approach to issue of researching dust-explosion protection of mine workings of coal mines. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2019;10(2):1154–1161.
9. Hasheminasab F., Bagherpour R., Aminossadati S.M. Numerical simulation of methane distribution in development zones of underground coal mines equipped with auxiliary ventilation. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2019;89:68–77. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.03.022>
10. Yuez L., Akhtar S., Sasmito A.P., Kurnia J.C. Prediction of air flow, methane, and coal dust dispersion in a room and pillar mining face. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2017;27(4):657–662. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2017.05.019>



11. Lolon S.A., Brune J.F., Bogin G.E., Juganda A. Study of methane outgassing and mitigation in longwall coal mines. *Mining, Metallurgy and Exploration*. 2020;37(5):1437–1449. <https://doi.org/10.1007/s42461-020-00287-6>
12. Lebedev V.S., Skopintseva O.V. Residual coalbed gas components: composition, content, hazard. *Gornyi Zhurnal*. 2017;(4):84–86. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2017.04.17>
13. Filin A.E., Kurnosov I.Yu., Kolesnikova L.A. Description of the methodology for conducting an experiment on dust deposition of mining and metallurgical production. *Ugol'*. 2022;(9):67–72. (In Russ.) <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2022-9-67-72>
14. Smirnyakov V.V., Smirnyakova V.V., Pekarchuk D.S., Orlov F.A. Analysis of methane and dust explosions in modern coal mines in Russia. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2019;10(2):1917–1929.
15. Slastunov S., Kolikov K., Batugin A. et al. Improvement of intensive in-seam gas drainage technology at Kirova Mine in Kuznetsk Coal Basin. *Energies*. 2022;15(3):1047. <https://doi.org/10.3390/en15031047>
16. Shulyatieva L.I., Mayorova L.V. Parametric modeling and arrangement of gas drainage in coal mines. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2022;(8):168–179. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_8_0_168
17. Kornev A.V., Korshunov G.I., Kudelas D. Reduction of dust in the longwall faces of coal mines: Problems and perspective solutions. *Acta Montanistica Slovaca*. 2021;26(1):84–97. <https://doi.org/10.46544/AMS.v26i1.07>
18. Skopintseva O.V., Ganova S.D., Demin N.V., Papichev V.I. Integrated method of dust and gas hazard reduction in coal mines. *Gornyi Zhurnal*. 2018;(11):97–100. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2018.11.18>
19. Skopintseva O.V., Vertinsky A.S., Ilyakhin S.V. et al. Justification of rational parameters of dedusting treatment of coal mass in mines. *Gornyi Zhurnal*. 2014;(5):17–20. (In Russ.)
20. Bosikov I.I., Klyuev R.V., Aimbetova I.O., Makhosheva S.A.I. Assessment and analysis of aerodynamic parameters of air flows for effective selection of air supply schemes in coal mines. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2021;13(3):397–405. (In Russ.) <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2021-13-3-397-405>
21. Yi H., Park J., Kim M.S. Characteristics of mine ventilation air flow using both blowing and exhaust ducts at the mining face. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2020;34:1167–1174. <https://doi.org/10.1007/s12206-020-0218-0>
22. Li Y., Su H., Ji H., Cheng W. Numerical simulation to determine the gas explosion risk in longwall goaf areas: A case study of Xutuan Colliery. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2020;30(6):875–882. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2020.07.007>
23. Popov M.D., Kormshchikov D.S., Semin M.A., Levin L.Yu. Calculation of air flows stability in the mine workings by the factor of thermal depression in the analytical complex “Aeroset”. *Occupational Safety in Industry*. 2020;(10):24–32. <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2020-10-24-32>
24. Tarasenko I.A., Kulikova A.A., Kovaleva A.M. On the issue of assessing the automation of control of the parameters of the methane-air mixture. *Ugol'*. 2022;(11):84–88. (In Russ.) <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2022-11-84-88>
25. Kulikova E.Yu., Konyukhov D.S. Accident risk monitoring in underground space development. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2022;(1):97–103. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_1_0_97
26. Zakharov V.N., Kubrin S.S. Digital transformation and intellectualization of mining systems. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2022;(5–2):31–47. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_52_0_31
27. Kazanin O. I., Meshkov A. A., Sidorenko A. A. Prospects for development of a technological structure of underground coal mines. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2022;(6–1):35–53. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_61_0_35
28. Cheng L., Guo H., Lin H. Evolutionary model of coal mine safety system based on multi-agent modeling. *Process Safety and Environmental Protection*. 2021;147:1193–1200. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.01.046>
29. Nguyen Q.L., Nguyen Q.M., Tran D.T., Bui X.N. Prediction of ground subsidence due to underground mining through time using multilayer feed-forward artificial neural networks and back-propagation algorithm – case study at Mong Duong underground coal mine (Vietnam). *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021;6(4):241–251. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-4-241-251>

Информация об авторе

Сергей Владимирович Баловцев – кандидат технических наук, доцент, Университет науки и технологий МИСИС, г. Москва, Российская Федерация; ORCID 0000-0002-0961-6050, Scopus ID 56780405300; e-mail balovtcev@yandex.ru

Information about the author

Sergey V. Balovtsev – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, National University of Science and Technology MISiS, Moscow, Russian Federation; ORCID 0000-0002-0961-6050, Scopus ID 56780405300; e-mail balovtcev@yandex.ru

Поступила в редакцию	17.08.2022	Received	17.08.2022
Поступила после рецензирования	14.11.2022	Revised	14.11.2022
Принята к публикации	01.09.2022	Accepted	01.09.2022



ГОРНЫЕ МАШИНЫ, ТРАНСПОРТ И МАШИНОСТРОЕНИЕ

Обзорная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-06-06>

УДК 622.331:62-5

**Системный подход к развитию классификации торфяных машин и оборудования**Б. Ф. Зюзин  , Т. Б. Яконовская   , А. И. Жигульская  

Тверской государственной технической университет, г. Тверь, Российская Федерация

 tby81@yandex.ru**Аннотация**

В «Стратегии национальной безопасности РФ до 2030 г.» приоритетными направлениями являются: использование ресурсосберегающих и безотходных технологий добычи и переработки природного сырья, импортозамещение горной техники в горнодобывающем секторе РФ, а также внедрение цифровых технологий на всех этапах добычи и переработки сырьевых ресурсов в горных отраслях для повышения их безопасности. Цель статьи заключается в исследовании поэтапного развития классификации торфяной техники и необходимости ее совершенствования в связи с созданием средств комплексной механизации процессов безотходной добычи и переработки ресурсов торфяных месторождений с применением мобильных комплексов полного цикла с разработкой экологически безопасных и ресурсосберегающих технологий торфяного производства. Методологической основой исследования являются: ретроспективный анализ, теория проектирования торфяных машин и системный анализ. В качестве результата исследования приводятся новые системные факторы, влияющие на развитие классификации имеющихся в настоящее время машин и оборудования торфяного производства, а также ее варианты, объединяющие процессы добычи и переработки ресурсов торфяного месторождения, позволяющие моделировать структуру мобильных комплексов полного цикла безотходной добычи и переработки ресурсов торфяной залежи. С точки зрения практического применения классификация торфяных машин позволяет разработать информационную систему для принятия рационального решения по оптимизации структуры парка технологических машин и оборудования торфодобывающих предприятий с учетом ухудшающихся условий эксплуатации торфяного месторождения, современного развития технологий разработки торфяного месторождения, экономического состояния отрасли и современных тенденций цифровизации в добывающих производствах.

Ключевые слова

торфяное машиностроение, торфяная техника, классификация, системный подход, методология, направления совершенствования конструкции, условия эксплуатации

Для цитирования

Zyuzin B. F., Yakonovskaya T. B., Zhigulskaya A. I. A systematic approach to the peat machines and equipment classification development. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2022;7(4):320–329. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-06-06>

MINING MACHINERY, TRANSPORT, AND MECHANICAL ENGINEERING

Review article

A systematic approach to the peat machines and equipment classification developmentB. F. Zyuzin  , T. B. Yakonovskaya   , A. I. Zhigulskaya  

Tver State Technical University, Tver, Russian Federation

 tby81@yandex.ru**Abstract**

The «National Security Strategy of the Russian Federation until 2030» prioritises the use of resource-saving and waste-free technologies for natural resource extraction and processing, import substitution of mining equipment in the Russian mining sector, and the introduction of digital technologies at all stages of resource extraction and processing in the mining industry to improve their safety. The aim of the article is to study the gradual development of peat machinery classification and the relevance of its improvement through integrated mechanization devices to create waste-free extraction and processing of peat deposits using full-cycle mobile complexes with the development of environmentally friendly and resource-saving technologies



for peat production. The methodological basis of the research includes post-event analysis, peat machine design theory, and systems analysis. As a research result, new system factors influencing the development of the classification of currently available machinery and equipment for peat production, as well as classification variants combining the processes of extraction and processing of peat deposit resources are provided, which allow modeling the structure of full-cycle mobile complexes for extraction and processing of peat deposit resources without waste. In terms of practical application, the classification of peat machinery enables the development of a rational decision-making data system for optimizing the structure of the technological machinery and equipment fleet of peat extraction enterprises, taking into account the deteriorating conditions of peat resources and development technologies, the economic conditions of the industry and the current trends of digitalization in the extractive industry.

Keywords

peat engineering, peat machinery, classification, system approach, methodology, design improvement directions, operating conditions

For citation

Zyuzin B. F., Yakonovskaya T. B., Zhigul'skaya A. I. A systematic approach to the peat machines and equipment classification development. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2022;7(4):320–329. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-06-06>

Введение

В период индустриального развития торфяной отрасли в России до 1990-х годов торфопредприятия отличались крупномасштабными размерами, площадями освоения торфяных залежей, объемами добычи, кадровыми ресурсами и высокой степенью механизации производственных процессов. Все технологическое оборудование на торфоразработках было российского производства, причем ежегодно серийно выпускались различные виды торфяной техники. Ассортиментный ряд заводов торфяного машиностроения был довольно представительным, что потребовало создания специальной классификации торфяных машин и комплексов [1–4]. Торфодобывающая техника регламентировалась отдельными техническими условиями на изготовление и имела собственную систему обозначения машин. Конструкции машин для добычи и переработки торфа были весьма разнообразны из-за большого количества различных способов и технологий производства торфяной продукции.

Современные условия работы торфодобывающего и торфоперерабатывающего производства диктуют новые требования к технологическому торфяному оборудованию и машинам. Разработанные до 1990-х годов конструкции отечественных торфяных машин и комплексов технологического оборудования этим требованиям не отвечают. Это объясняется несоответствием технических характеристик машин изменившимся условиям эксплуатации, недостаточным уровнем автоматизации, несовершенством конструкции и катастрофическим спадом торфопродукции [5, 6].

За последние 30 лет в отечественном торфяном машиностроении наступил кризис: уменьшение объемов произведенной и реализованной продукции, сужение номенклатуры выпускаемых технологических машин и оборудования, и, как следствие, – полная ликвидация большей части предприятий-производителей торфяной техники, либо их перевод на иной вид продукции, пользующейся стабильным спросом (коммунальную, сельскохозяйственную, лесную, строительно-дорожную, транспортную и прочую технику).

Значительная часть рынка торфяной техники представлена дорогими импортными машинами [7, 8].

На протяжении советского периода развития торфяной науки и техники главными ее центрами были: Московский торфяной институт, Всероссийский НИИ торфяной промышленности (ВНИИТП), НИИ ГИПРОТОРФ. В 1958 г. Московский торфяной институт был переведен в г. Тверь и стал основой для создания Тверского государственного технического университета. В 2010 г. распался ВНИИТП, и с тех пор центром торфяной науки и техники стала Тверская торфяная школа. За последние 20 лет в России появились новые научные торфяные школы в Санкт-Петербурге, Екатеринбурге и Томске. Каждая из них имеет свой научный взгляд на многие теоретические положения торфяной науки и техники, начиная с вопросов геологии и разведки торфяников, технологий разработки, классификации торфяной техники и до вопросов экономико-правового и социального характера развития отрасли. Часто в статьях различной торфяной тематики можно наблюдать подмену устоявшихся научных понятий, некорректное использование определения из других отраслей знаний, заново открываются явления, которые уже были открыты ранее, нарушаются авторские права ученых, что искажает первостепенное научное значение полученных данных. Такие факты подмены, на наш взгляд, неприемлемы, так как могут внести научную путаницу и ввести в заблуждение. Так, например, за последние 2–3 года появился ряд работ, в которых авторы утверждают, что в торфяной отрасли отсутствует «единая» классификация машин и оборудования для добычи и переработки торфяного сырья.

В этой связи на примере вопроса о классификации торфяной техники считаем важным пояснить, как проходил процесс разработки научной классификации торфяных машин и оборудования. Почему этот процесс был многократный и как логически развивалась классификация торфяных машин со временем, какие признаки классификации положены в ее основу различными авторами, что и является целью данной статьи.



Методика исследования теоретического развития научных взглядов по вопросу о классификации торфяной техники

Для проведения исследования теоретического развития научных взглядов по вопросу о классификации торфяной техники авторы используют ретроспективный, критический анализ известных классификаций торфяных машин. Развитие конструкций машин, разрабатывающих торфяные месторождения, добывающих и перерабатывающих торфяные ресурсы, тесно связано со способами и технологиями, используемыми в торфяной отрасли. Первая торфяная машина была разработана И.Ф. Гофманом в 1843 г. [2, 4, 6], и с этого времени начинается бурное развитие различных конструкций торфяных машин, которые позволяют механизировать отдельные операции технологического цикла добычи торфа. Следует отметить, что инженеры-конструкторы торфяных машин часто давали название созданной ими технике, используя свои фамилии (например, фрезерный барабан системы Сарматова, пресс Рогова и т.д.). В 1931 г. на базе Московского торфяного института зародилась научная дисциплина «Торфяные машины», которую читал профессор М.И. Сарматов, а научный курс «Машины гидроторфа» вел профессор И.Н. Глыбовский. С 1950-х годов Московский торфяной институт меняет место своей дислокации и перемещается в г. Калинин (ныне г. Тверь), и с этого времени центром торфяной науки становится Тверской государственный технический университет, в котором трудились и работают до сих пор корифеи торфяной науки. В вопросах торфяного машиностроения такими учеными были и остаются: М.В. Мурашов, Ф.А. Опейко, С.Г. Солопов, Л.Н. Самсонов, Л.О. Горцакалян, В.И. Цветков, Б.Ф. Зюзин, В.Ф. Синецын и др. Вплоть до 1948 г. термин «классификация» торфяной техники не использовался, и только в своей книге профессор С.Г. Солопов впервые ввел этот термин, предприняв первую попытку классифицировать торфяную технику. Его классификация представлена в письменном виде, в ней торфяные машины сгруппированы по принципу используемого способа добычи и по ходу операций технологического цикла добычи торфа, большое внимание уделено машинам гидроспособа разработки торфяной залежи и багерно-элеваторной технике [6]. Однако в связи с тем что в конце 1950-х годов особой популярностью стал пользоваться фрезерный способ добычи торфа из-за его высоких технико-экономических показателей, возникла необходимость в исследовании работы основной добывающей машины – фрезерного барабана (фрезера). Поэтому в своей диссертационной работе М.В. Мурашов в 1964 г. первым приводит письменную классификацию фрезерующих машин по следующим принципам: методу экскавации; отношению к фрезерованию древесных включений залежи; технологическому назначению; конструкции фрезеров; форме фрезы и конструкции экскавирующих элементов. Так как фрезер является добывающей машиной, непосредственно занятой выемкой торфа из торфяной залежи, особое внима-

ние в дальнейшем уделялось его взаимодействию с торфом и древесными включениями. Так, в работе Ф.А. Опейко [9] приводится в табличном виде классификация гусеничного хода и экскавирующих устройств торфяных машин по числу степеней свободы режущего элемента, а также по виду выполняемой операции. Примечательно, что в классификации Ф.А. Опейко эволюция конструкций торфяных машин тесным образом связана с увеличением степеней свободы экскавирующего органа. Он также указывает на то, что классификация торфяных машин по выполняемым операциям цикла добычи торфа может иметь недостаточную системность и четкость, так как одна машина может выполнять несколько операций и обладать многофункциональностью или часть операций при использовании той или иной системы машин может отсутствовать. Следует отметить, что именно Ф.А. Опейко выдвинул идею о том, что с возрастанием технического уровня торфяных машин и усложнением расчетов при их конструировании необходимо не только учитывать экспериментальные данные их работы, но и «...возможности современных моделирующих и цифровых вычислительных приборов». И именно с вышеприведенного высказывания Ф.А. Опейко в 1968 г. начинается процесс автоматизации и использования цифровых устройств в конструкции и управлении торфяными машинами, процесс их конструирования и применения диспетчеризации в управлении торфяными предприятиями. Основоположниками этого направления по праву можно считать представителей Тверской торфяной школы [10]: Н.М. Караваеву, А.И. Буракову, В.И. Кузнецова, А.Н. Волкова, Г.А. Дмитриева, Б.В. Палюха. Представляет интерес процесс совершенствования конструкций торфяной техники в связи с усложнением горно-геологических, климатических условий добычи торфа и развитием технологической добычи, а именно механизации, комплексной механизации, автоматизации и цифровизации торфяного производства (рис. 1).

Следующей вехой в развитии классификации торфяных машин считается работа профессора С.Г. Солопова 1972 г. [11]. Это вторая модификация разработанной им в 1948 г. классификации, которая отличается тем, что в ней появляются термины «комплекс» и «комплексный агрегат», которые до него никто в торфяном машиностроении еще не использовал. Строго говоря, профессор С.Г. Солопов разработал три классификации торфяной техники, но в его работе 1981 г. [12] отсутствует комплексный агрегат по сушке торфа на ситах в штабеле. Торфяные машины в его классификациях сгруппированы по принципу вида получаемого торфа-сырца (кусовой и фрезерный крошкообразный торф) и по принципу выполнения операций технологического процесса разработки торфяного месторождения.

Ввиду развития направлений хозяйственного использования торфа в советское время и в настоящий момент практически ежегодно ученые создают новые виды торфяной продукции, требующие различной степени переработки исходного торфяного сырья. Поэтому возникла необходимость в классификации

оборудования, используемого в технологиях переработки торфа, и в 1990 г. профессор О.С. Горфин первым разработал классификацию заводского торфоперерабатывающего оборудования [13]. К началу 1990 г. большая часть торфяных месторождений регионов европейской части России была выработана, ухудшились горно-геологические условия добычи торфа, которые проявились в снижении качества торфяников, вовлекаемых в разработку. Одним из главных качественных показателей торфяного месторождения наряду со степенью разложения является пнистость, и чем выше процент наличия погребенной древесины в залежи, тем ниже производительность и качество работы торфяного фрезера (послойно-поверхностного или глубокого сплошного фрезерования). В этой связи в 1989 г. Б. Ф. Зюзин в своей работе [14] приводит подробную классификацию торфяных фрез как рабочего органа основной добывающей торф машины. Изменившиеся экономические условия ведения хозяйственной деятельности в России и резкий спад объемов добычи торфа привели к необходимости разработки новых технологий добычи и переработки торфа. И по этой причине в 1999 г. профессора Л.Н. Самсонов

и В.Ф. Сеницын усовершенствовали классификацию торфяных машин, предложенную в 1981 г. профессором С.Г. Солоповым. Известна также классификация профессора В.Д. Копенкина 2002 г. [15], в которой он проводит связь между классификацией горных машин и основными структурными элементами классификации торфяных машин и комплексов. При этом предлагает рассматривать торфяную технику как подкласс горных машин и оборудования и использует термин «геотехника». Отличается классификация В.Д. Копенкина тем, что он на основе исследования классификаций горных машин предлагает использовать некоторые из них (бульдозеры, экскаваторы) для целей разработки торфяных месторождений. Обуславливает он это предложение отсутствием доступного российского торфяного машиностроения и использованием за рубежом карьерной техники [16–19]. Ввиду этого следует привести график, иллюстрирующий ход истории развития классификации торфяной техники, построенный авторами по методу В.Д. Копенкина, для исследования потоков научной информации по вопросу о классификации торфяных машин и оборудования (рис. 2).

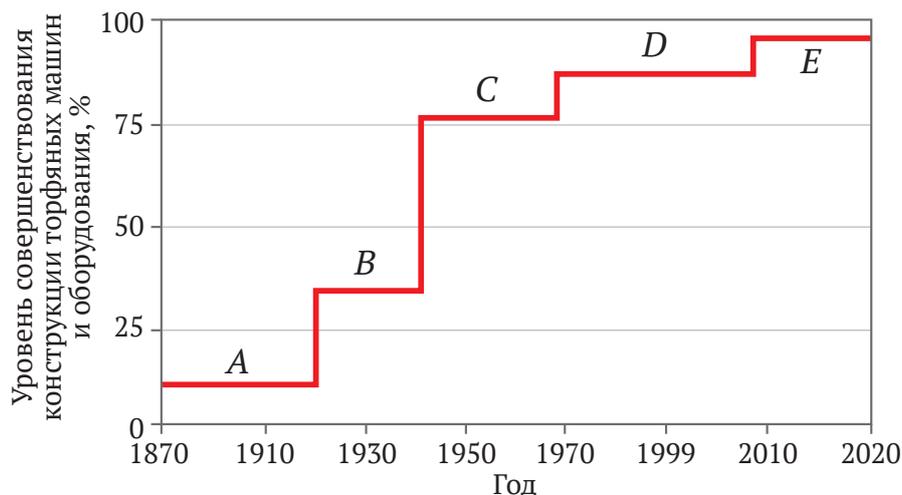


Рис. 1. Уровни совершенствования конструкций торфяной техники (составлено авторами):
А – частичная механизация; В – механизация; С – комплексная механизация; D – частичная автоматизация;
Е – автоматизация и частичная цифровизация

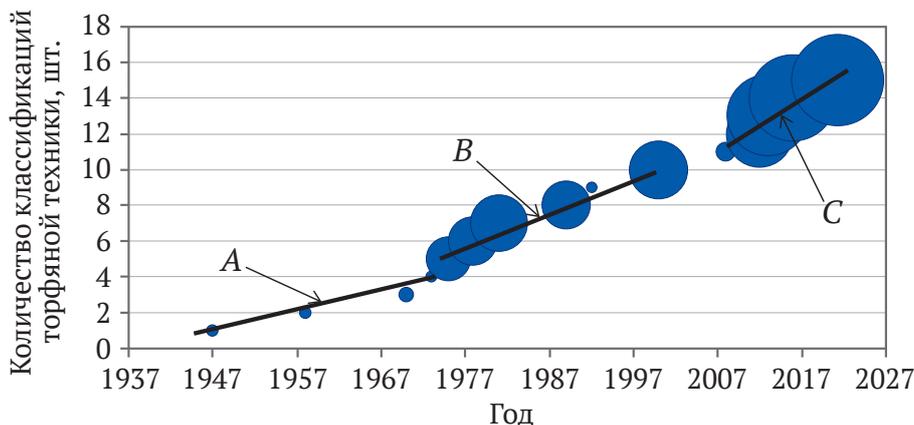


Рис. 2. Эволюция классификаций торфяных машин (составлено авторами)

Как можно видеть из рис. 2, развитие взглядов по вопросу о классификации торфяных машин и оборудования имеет давнюю историю и три этапа научного развития (отрезки А, В, С), которые тесно связаны с изменяющимися условиями ведения производственной и хозяйственной деятельности торфяных предприятий, а именно: экономическими, горно-геологическими и технологическими, связанными с совершенствованием способов и технологий разработки торфяных месторождений (геотехнологиями). Причем каждая последующая классификация была усовершенствованной модификацией предыдущей версии (выделено большими кружками). А некоторые ее структурные элементы (выделены маленькими кружками) связаны с эволюцией конструкции рабочих органов и ходовой части торфяных машин и представляют собой отдельные научные направления. Цель этих направлений проявляется в глубоком и подробном изучении процессов взаимодействия рабочих элементов торфяных машин с торфяной залежью, обладающей различными геологическими, структурными, физико-механическими и гидродинамическими свойствами. Последний (третий) этап развития научного интереса к теме классификации торфяной техники начался с 2012 г. и характеризуется внедрением селективных геотехнологий освоения торфяного месторождения с использованием гибридных, универсальных, мобильных и автономных комплексов торфяных машин и оборудования, что обусловлено тенденцией цифровой трансформации технологических процессов в добывающей отрасли [20–22].

Использование системного подхода к разработке комплексной классификации торфяной техники

Классификация – это общенаучный метод систематизации знаний, направленный на организацию некоторой совокупности изучаемых объектов различных областей действительности, знания и деятельности, в систему соподчиненных групп (классов), по которым эти объекты распределены на основании их сходства в определенных существенных свойствах. В Большой советской энциклопедии под класси-

фикацией понимается «система соподчиненных понятий (классов объектов) какой-либо области знания или деятельности человека, часто представляемая в виде различных по форме схем (таблиц) и используемая как средство для установления связей между этими понятиями или классами объектов, а также для точной ориентировки в многообразии понятий или соответствующих объектов». Основные задачи классификации заключаются в фиксировании связей и закономерностей между объектами, которые имеют одинаковые свойства, а также хранение и поиск информации. В этой связи любую классификацию можно рассматривать как прототип базы данных. С этой точки зрения классификация позволяет развивать науку и технику, начиная с этапа накопления теоретических знаний и до их систематизации. Классификация, фундаментом которой являются глубокие научные знания, позволяет увидеть, в каком состоянии находятся наука, техника или ее структурные элементы, а также сделать адекватные прогнозы их развития [23–25].

Для разработки классификаций торфяной техники авторы использовали принципы и методы системного подхода. Системный подход позволяет выявить целостность объекта путем определения различных связей, формирующих комплексное и целостное представление об исследуемом объекте. С точки зрения системного подхода классификация – это сложная упорядоченная система элементов, объединенных структурными связями для достижения определенной цели (рис. 3).

Системный анализ позволяет утверждать, что между технологическими машинами торфяного производства, условиями освоения торфяника и технологиями добычи и переработки торфа существует тесная связь [26, 27]. Изменение и совершенствование технологий торфяного производства приводит к необходимости создания новых машин и совершенствования их конструкции, а значит факторы, оказывающие влияние на развитие технологий добычи и переработки ресурсов торфяника, оказывают прямое влияние на конструкцию торфяных машин и комплектацию технологических комплексов [28, 29].

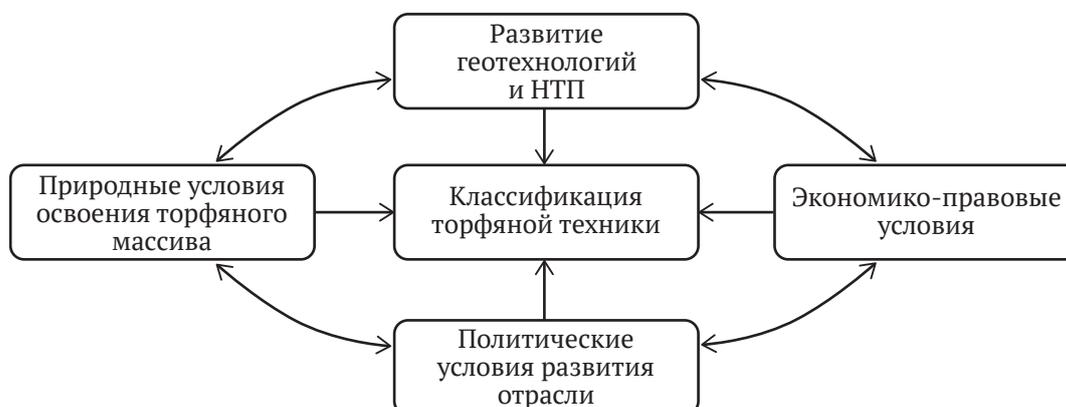


Рис. 3. Системные факторы, воздействующие на эволюцию классификации торфяной техники (составлено авторами)

Обсуждение результатов исследования

Анализ рис. 3 показывает, что классификация торфяных машин постоянно совершенствуется ввиду влияния объективных системных факторов, к которым относятся: развитие торфяных геотехнологий, совершенствование конструкций торфяных машин с целью повышения их эксплуатационных свойств, удешевление и импортозамещение, развитие современного горного машиностроения, ухудшение горно-геологических и климатических условий разработки торфяников, экономико-правовые и организационные условия. С учетом этих факторов авторами с 2012 г. предложены 4 модификации классификации

торфяной техники, каждая из которых является логическим продолжением предыдущей и представлена в опубликованных работах [2, 4].

Классификация торфяных машин в работе [4] 2012 г. разработана по принципу вида добываемого ресурса торфяной залежи. В этой классификации впервые как самостоятельный вид сырья выделяется «торфодревесное сырье», и, таким образом, структура сырья торфяной залежи включает: торф; древесное сырье, получаемое при сводке древесной растительности в технологическом процессе подготовки торфяного месторождения к разработке; торфодревесное сырье, получаемое в технологическом процессе глу-

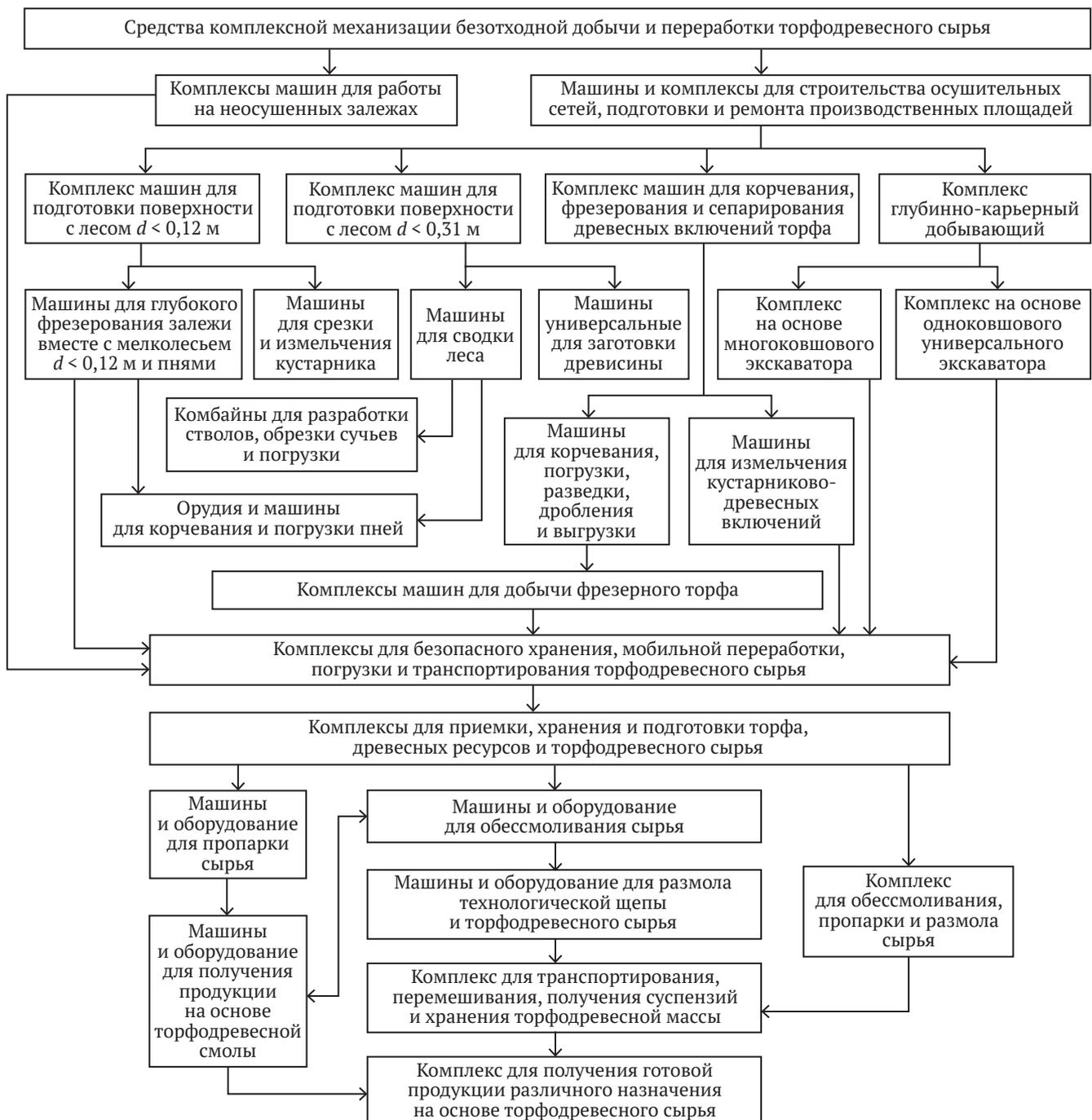


Рис. 4. Фрагмент «Классификация торфяной техники 2020 г.» для производства торфодревесного сырья (составлено авторами)



боклого (сплошного) фрезерования торфа совместно с древесной растительностью, произрастающей на поверхности торфяника и погребенной древесины в толще торфяного массива.

Ввиду сходства технологического процесса подготовки торфяной залежи к разработке с аналогичными процессами в других природоэксплуатирующих отраслях (например, отрасли горнопромышленного комплекса, лесозаготовительная и пр.) и отсутствия массового выпуска торфяной техники в России авторами включаются в классификацию машины лесопромышленного, горнодобывающего, агропромышленного, строительного-дорожного комплексов. Это позволяет вывести новое определение торфяных комплексов – «Смешанные комплексы».

Классификация торфяной техники в работе [4] отличается тем, что в ней используются новые признаки – «условия освоения торфяника» и «тип организации производства», которые позволяют выделить новые комплексы техники: «Мобильная торфяная техника по добыче и переработке торфа в полевых условиях» и «Энергетический автономный торфяной комплекс». В классификации 2020 г., представленной на рис. 4, добавлены комплексы, позволяющие выделить технику для безопасного хранения торфа, древесного, торфодревесного сырья; мобильной переработки, погрузки, транспортировки и приемки торфа и торфодревесных ресурсов.

В связи с наметившейся мировой тенденцией перехода горных производств к идеологии Mining 4.0, усложнением экономико-политических и горно-геологических условий освоения торфяных месторождений и необходимостью оптимизации ассортимента торфопродукции, а также использованием селективных геотехнологий авторами в новой комплексной классификации торфяной техники вводятся принципы классификации: «сложность технологии разработки торфяного месторождения», «уровень механизации, автоматизации и цифровизации торфяных технологических процессов». Данные принципы позволили выделить «Гибридные и селективные геотехнологии» и соответствующие «Гибридные комплексы торфяных машин», которые подразумевают автоматизированное, автономное, роботизированное и цифровое управление. Такие «Гибридные комплексы» позволят торфяному производству вступить в эру цифровой трансформации технологических процессов добычи и переработки сырьевых ресурсов торфяного месторождения [5].

Заключение

В результате проведенного исследования авторами были сделаны следующие выводы:

1. Развитие всех классификаций торфяной техники проходило по главному принципу связи технологического оборудования со способами разработки торфяного месторождения и операциями производственного цикла добычи и переработки торфа.

2. В предложенной авторами классификации вводится принцип «Гибридные комплексы». Это связано с развитием научных взглядов на проблему селектив-

ной разработки месторождения торфа и ухудшением условий разработки торфяных месторождений.

3. Авторы выделяют новый тип сырья торфяной залежи – «торфодревесное сырье» – это погребенная древесина, пни, которые в традиционных технологиях разработки месторождения торфа рассматривались как отходы, корчевались и вывозились в отвал, а затем перерабатывались в низкосортные дрова.

4. Получаемое торфодревесное сырье требует использования нового вида оборудования. Поэтому авторы вводят в классификацию принцип «Вид получаемого сырья».

5. Ввиду развития цифровизации горного производства авторы вводят принцип «Уровень механизации, автоматизации, цифровизации торфяных технологических процессов» для классификации торфяных машин.

6. Так как в России рынок торфяного машиностроения представлен в основном иностранной техникой, а отечественные торфяные машины выпускаются в единичном виде под заказ, то авторы предлагают использовать машины из других природоэксплуатирующих отраслей со схожим принципом работы (лесной, сельскохозяйственной, горной и др.). Ввиду этого в классификации торфяной техники может появиться новый термин, характеризующий направления совершенствования геотехнологий освоения торфяных месторождений – «Смешанные (гибридные) комплексы и технологии».

7. Существует два вектора развития классификации торфяной техники: 1. По ходу технологического процесса освоения торфяного месторождения, виду выполняемых операций и типу получаемого сырья (торфяная крошка, гранулы, кусок, гидромасса, торфодревесное сырье, торфяная вода, низкосортная древесина, охёс, влажный торф (торф-сырец)); 2. По виду конструктивных элементов (классификации: ходовой части, рабочих органов, типу двигателей, типу приводов, виду управления и т.д.).

8. С позиций системного подхода авторы полагают, что классификация торфяной техники не должна быть статичной. Она должна динамично развиваться под влиянием действующих на нее факторов, позволять прогнозировать и предвидеть возможные направления развития комплексов торфяных машин.

9. Так как классификация торфяной техники представляет собой систему, которая развивается и эволюционирует под действием влияющих на нее системных факторов (например, различные технологические санкции, государственная программа цифровой трансформации отраслей российской промышленности, технологии «нейтрального углеродного следа», «зеленые технологии»), то ввиду использования в горной отрасли идеологии Mining 4.0 дальнейшее совершенствование конструкции всех видов торфяных комплексов будет усложняться за счет внедрения в конструкцию торфяных технологических машин элементов искусственного интеллекта и IT-технологий.



Список литературы

1. Марков В.И. Периоды развития торфяной промышленности России. *Труды Инсторфа*. 2011;(6):10–21.
2. Зюзин Б.Ф., Яконовская Т.Б., Жигульская А.И. и др. Современные направления модернизации комплексов оборудования в связи с эволюцией способов добычи торфа. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2015;(6):67–73. URL: <https://giab-online.ru/files/Data/2015/06/67-73.pdf>
3. Якупов Д.Р., Иванов С.Л., Иванова П.В., Пермьякова Е.К. К вопросу классификации способов добычи торфяного сырья и средств их реализации. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2020;(S34):3–11. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-10-34-3-11>
4. Жигульская А.И., Яконовская Т.Б. *Экономические и инженерные аспекты нового оборудования и технология комплексной безотходной добычи и переработки ресурсов торфяного месторождения*. М.; 2013. 160 с. Деп. в изд-ве МГТУ 30.01.2013, № 953/04-13.
5. Зюзин Б.Ф., Жигульская А.И., Яконовская Т.Б. и др. Машины и оборудование для разработки торфяных месторождений, как класс горных машин для открытых горных работ. В: Лагунова Ю.А. (ред.) *Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: сб. тр. XVIII междунаучно-технической конференции «Чтения памяти В.Р. Кубачека», проведенной в рамках Уральской горнопромышленной декады*. Екатеринбург, 02–03 апреля 2020 г. Екатеринбург: УГГУ; 2020. С. 36–39.
6. Опейко Ф.А. *Торфяные машины*. Минск: «Высшая школа»; 1968. 408 с.
7. Солопов С.Г., Горцакалян Л.О., Самсонов Л.Н. *Торфяные машины и комплексы*. М.: Недра; 1972. 392 с.
8. Солопов С.Г., Горцакалян Л.О., Самсонов Л.Н., Цветков В.И. *Торфяные машины и комплексы*. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Недра; 1981. 416 с.
9. Горфин О.С. *Машины и оборудование по переработке торфа*. М.: Недра; 1990. 318 с.
10. Копенкин В.Д., Копенкина Л.В. Торфяные машины как класс горных машин. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2002;(5).
11. Ozdogan M., Makin I. *Wheel bulldozers and their usage at quarries, mines and construction sites*. Ankara: Danışmanlık Ltd; 2020.
12. Weaver B. *Bulldozer types, parts and their uses*. 2019. URL: <https://www.bigrentz.com/blog/bulldozer-types>
13. Ozdogan M., Makin I. Hidrolikters-kepçenininkazikuvvetleri (çolakkepeç). *İş Makinaları Mühendisleri Birliği Derneği Journal*. 2020;(69):22–28. (In Turkish). URL: <https://www.ismakinalari.org.tr/uploads/files/610bacc8d1d55.pdf>
14. Lee Y.-S., Kim S.-H., Seo J. et al. Blade control in Cartesian space for leveling work by bulldozer. *Automation in Construction*. 2020;118:103264. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103264>
15. Ha Q.P., Yen L., Balaguer C. Robotic autonomous systems for earthmoving in military applications. *Automation in Construction*. 2019;107:102934. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102934>
16. Mehari Z.T., Thomas R.W., Zamir S., Robert L.S. Modeling soil-bulldozer blade interaction using the discrete element method (DEM). *Journal of Terramechanics*. 2020;88:41–52. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2019.12.003>
17. Hirayama M., Guivant J., Katupitiya J., Whitty M. Path planning for autonomous bulldozers. *Mechatronics*. 2019;58:20–38. <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2019.01.001>
18. Kai R. Bulldozer politics», state-making and (neo-)extractive industries in Tanzania's gold mining sector. *The Extractive Industries and Society*. 2019;6(2):407–412. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2018.10.012>
19. Qinsen Y., Shuren S. A soil-tool interaction model for bulldozer blades. *Journal of Terramechanics*. 1994;31(2):55–65. [https://doi.org/10.1016/0022-4898\(94\)90007-8](https://doi.org/10.1016/0022-4898(94)90007-8)
20. Pinar M.A., Barker M.G., Tay J. Soil disturbance and post-logging forest recovery on bulldozer paths in Sabah, Malaysia. *Forest Ecology and Management*. 2000;130(1–3):213–225. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(99\)00192-9](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(99)00192-9)
21. Bansah K.J., Dumakor-Dupey N.K., Kansake B.A., et al. Socioeconomic and environmental assessment of informal artisanal and small-scale mining in Ghana. *Journal of Cleaner Production*. 2018;202:465–475. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.150>
22. Do T.C., Dang T.D. et al. Developments in energy regeneration technologies for hydraulic excavators: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021;145:111076. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111076>
23. Слесарев Б.В., Мерзляков В.Г. Достигнутые показатели и особенности применения мощных карьерных гидравлических экскаваторов на открытых разработках. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2017;(S38):13–22. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2017-12-38-13-22>
24. Снетков Д.С., Косолапов А.И. Обоснование мобильного выемочно-погрузочного оборудования для разработки буроугольных месторождений в режиме управления качеством. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2017;(S38):193–198. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2017-12-38-193-198>
25. Аргимбаев К.Р., Лигоцкий Д.Н., Логинов Е.В. Бульдозерная технология открытой разработки известняководомитовых месторождений. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2020;(3):16–29. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-3-0-16-29>



26. Трубецкой К. Н., Рыльникова М. В., Владимиров Д. Я., Пыталев И. А. Условия и перспективы внедрения роботизированных геотехнологий при открытой разработке месторождений. *Горный журнал*. 2017;(11):60–64. <https://doi.org/10.17580/gzh.2017.11.11>

27. Рыльникова М. В., Владимиров Д. Я., Пыталев И. А., Попова Т. М. Роботизированные геотехнологии как путь повышения эффективности и экологизации освоения недр. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2017;(1):92–101. URL: <https://www.sibran.ru/upload/iblock/1b5/1b54bd8619dc4334ccc52cd877c5be70.pdf>

28. Гавришев С. Е., Пыталев И. А., Гапонова И. В., Якшина В. В. Подход к оценке влияния перехода на роботизированную геотехнологию при комплексном освоении недр. В: *Современные достижения университетских научных школ. Сборник докладов национальной научной школы-конференции*. Магнитогорск, 19–20 ноября 2020 г. Магнитогорск: МГТУ им. Г. И. Носова; 2020. С. 154–158.

29. Плакиткин Ю. А., Плакиткина Л. С. Программы «Индустрия-4.0» и «Цифровая экономика Российской Федерации» – возможности и перспективы в угольной промышленности. *Горная промышленность*. 2018;(1):22–28. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2018-1-137-22-28>

References

1. Markov V.I. Periods of peat industry of Russia. *Trudy Instorfa*. 2011;(6):10–21. (In Russ.)
2. Zyuzin B.F., Yakonovskaya T.B., Zhigul'skaya A.I. et al. Current trends in retrofit installation in view of advance in peat digging. *Mining informational and analytical bulletin*. 2015;(6):67–73. (In Russ.) URL: <https://giab-online.ru/files/Data/2015/06/67-73.pdf>
3. Iakupov D.R., Ivanov S.L., Ivanova P.V., Permyakova E.K. Classification of peat extraction methods and means of their implementation. *Mining informational and analytical bulletin*. 2020;(S34):3–11. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-10-34-3-11>
4. Zhigul'skaya A.I., Yakonovskaya T.B. *Economic and engineering aspects of new equipment and technology for integrated non-waste extraction and processing of peat deposits*. Moscow; 2013. 160 p. Deposited in the Publ. House of the Moscow State University for the Humanities on January 30, 2013, No. 953/04-13. (In Russ.)
5. Zyuzin B., Zhigul'skaya A., Yakonovskaya T. et al. Machines and equipment for the development of peat deposits as a class of mining machines for open cast mining. In: Lagunova Yu.A. (ed.) *Technological Equipment for the Mining and Oil and Gas Industry. Collection of Proceedings of the XVIII International Scientific and Technical Conference "Readings in Memory of V. R. Kubachek"*. Yekaterinburg, 02–03 April 2020. Yekaterinburg: Ural State Mining University; 2020. Pp. 36–39. (In Russ.)
6. Opeyko F.A. *Peat machines*. Minsk: Vysshaya Shkola Publ. House; 1968. 408 p. (In Russ.)
7. Solopov S.G., Gortsakalyan L.O., Samsonov L.N. *Peat machines and complexes*. Moscow: Nedra Publ. House; 1972. 392 p. (In Russ.)
8. Solopov S.G., Gortsakalyan L.O., Samsonov L.N., Tsvetkov V.I. *Peat machines and complexes*. 2nd ed. Moscow: Nedra Publ. House; 1981. 416 p. (In Russ.)
9. Gorfin O.S. *Machines and equipment for peat processing*. Moscow: Nedra Publ. House; 1990. 318 p.
10. Kopenkina L.V., Kopenkin V.D. Peat machines as a class of mining machines. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2002;(5). (In Russ.)
11. Ozdogan M., Makin I. *Wheel bulldozers and their usage at quarries, mines and construction sites*. Ankara: Danışmanlık Ltd; 2020.
12. Weaver B. *Bulldozer types, parts and their uses*. 2019. URL: <https://www.bigrentz.com/blog/bulldozer-types>
13. Ozdogan M., Makin I. Hidrolikters-kepçenin kazıkuvvetleri (çolakkepçe). *İş Makinaları Mühendisleri Birliği Derneği Journal*. 2020;(69):22–28. (In Turkish). URL: <https://www.ismakinalari.org.tr/uploads/files/610bacc8d1d55.pdf>
14. Lee Y.-S., Kim S.-H., Seo J. et al. Blade control in Cartesian space for leveling work by bulldozer. *Automation in Construction*. 2020;118:103264. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103264>
15. Ha Q.P., Yen L., Balaguer C. Robotic autonomous systems for earthmoving in military applications. *Automation in Construction*. 2019;107:102934. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102934>
16. Mehari Z.T., Thomas R.W., Zamir S., Robert L.S. Modeling soil-bulldozer blade interaction using the discrete element method (DEM). *Journal of Terramechanics*. 2020;88:41–52. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2019.12.003>
17. Hirayama M., Guivant J., Katupitiya J., Whitty M. Path planning for autonomous bulldozers. *Mechatronics*. 2019;58:20–38. <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2019.01.001>
18. Kai R. Bulldozer politics, state-making and (neo-)extractive industries in Tanzania's gold mining sector. *The Extractive Industries and Society*. 2019;6(2):407–412. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2018.10.012>
19. Qinsen Y., Shuren S. A soil-tool interaction model for bulldozer blades. *Journal of Terramechanics*. 1994;31(2):55–65. [https://doi.org/10.1016/0022-4898\(94\)90007-8](https://doi.org/10.1016/0022-4898(94)90007-8)
20. Pinar M.A., Barker M.G., Tay J. Soil disturbance and post-logging forest recovery on bulldozer paths in Sabah, Malaysia. *Forest Ecology and Management*. 2000;130(1–3):213–225. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(99\)00192-9](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(99)00192-9)



21. Bansah K.J., Dumakor-Dupey N.K., Kansake B.A., et al. Socioeconomic and environmental assessment of informal artisanal and small-scale mining in Ghana. *Journal of Cleaner Production*. 2018;202:465–475. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.150>

22. Do T.C., Dang T.D. et al. Developments in energy regeneration technologies for hydraulic excavators: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021;145:111076. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111076>

23. Slesarev B.V., Merzliakov V.G. Progress and features of operation powerful mining excavators on open pits. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2017;(S38):13–22. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2017-12-38-13-22>

24. Snetkov D.S., Kosolapov A.I. Justification of mobile handling equipment for the development of brown coal deposits in the quality management regime. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2017;(S38):193–198. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2017-12-38-193-198>

25. Argimbaev K.R., Ligotsky D.N., Loginov E.V. Bulldozer-based technology for open pit mining of limestone-dolomite deposits. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2020;(3):16–29. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-3-0-16-29>

26. Trubetskoy K.N., Rylnikova M.V., Vladimirov D.Ya., Pytalev I.A. Provisions and prospects for introduction of robotic geotechnologies in open pit mining Information about authors. *Gornyi Zhurnal*. 2017;(11):60–64. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2017.11.11>

27. Rylnikova M.V., Vladimirov D.Ya., Pytalev I.A., Popova T.M. Robotic geotechnologies as a way to increase the efficiency and ecologization of subsoil development. *Fiziko-Tekhnicheskiye Problemy Razrabotki Poleznykh Iskopaemykh*. 2017;(1):92–101. (In Russ.) URL: <https://www.sibran.ru/upload/iblock/1b5/1b54bd8619dc4334ccc52cd877c5be70.pdf>

28. Gavrishchev S.E., Pytalev I.A., Gaponova I.V., Yakshina V.V. Approach to assessing the impact of the transition to robotic geotechnology in the complex development of subsoil. In: *Modern Achievements of University Scientific Schools. Collection of Reports of the National Scientific School-Conference*. Magnitogorsk, November 19–20, 2020. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University; 2020. Pp. 154–158. (In Russ.)

29. Plakitkin Yu.A., Plakitkina L.S. Programs Industry-4.0 and Digital Economy of the Russian Federation – opportunities and horizons in the coal sector. *Russian Mining Industry*. 2018;(1):22–28. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2018-1-137-22-28>

Информация об авторах

Борис Федорович Зюзин – доктор технических наук, профессор, проректор по международным связям, заведующий кафедрой торфяных машин и оборудования, Тверской государственной технической университет, г. Тверь, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-8344-3047](https://orcid.org/0000-0002-8344-3047), ScopusID [55921005500](https://scopus.com/authorid/55921005500)

Татьяна Борисовна Яконовская – кандидат экономических наук, доцент кафедры экономики и управления производством, Тверской государственной технической университет, г. Тверь, Российская Федерация; ORCID [0000-0003-0604-0129](https://orcid.org/0000-0003-0604-0129), ScopusID [57196258982](https://scopus.com/authorid/57196258982); e-mail tby81@yandex.ru

Александра Ивановна Жигульская – кандидат технических наук, доцент кафедры торфяных машин и оборудования, Тверской государственной технической университет, г. Тверь, Российская Федерация; ORCID [0000-0003-4350-7314](https://orcid.org/0000-0003-4350-7314), ScopusID [57196259021](https://scopus.com/authorid/57196259021); e-mail 9051963@mail.com

Information about the authors

Boris F. Zyuzin – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Vice-Rector for International Relations, Head of the Department of Peat Machinery and Equipment, Tver State Technical University, Tver, Russian Federation; ORCID [0000-0002-8344-3047](https://orcid.org/0000-0002-8344-3047), ScopusID [55921005500](https://scopus.com/authorid/55921005500)

Tatiana B. Yakonovskaya – Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor, Department of Economics and Production Management, Tver State Technical University, Tver, Russian Federation; ORCID [0000-0003-0604-0129](https://orcid.org/0000-0003-0604-0129), ScopusID [57196258982](https://scopus.com/authorid/57196258982); e-mail tby81@yandex.ru

Alexandra I. Zhigul'skaya – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Peat Machinery and Equipment, Tver State Technical University, Tver, Russian Federation; ORCID [0000-0003-4350-7314](https://orcid.org/0000-0003-4350-7314), ScopusID [57196259021](https://scopus.com/authorid/57196259021); e-mail 9051963@mail.com

Поступила в редакцию	28.06.2022	Received	28.06.2022
Поступила после рецензирования	28.08.2022	Revised	28.08.2022
Принята к публикации	20.09.2022	Accepted	20.09.2022



ОПЫТ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТОВ В ГОРНОПРОМЫШЛЕННОМ СЕКТОРЕ ЭКОНОМИКИ

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-09-15>

УДК 622:330.341.2

**Стрессоустойчивость цепочек добавленной стоимости и стратегии поведения компаний в российской угольной отрасли****Е. В. Гоосен¹  , С. М. Никитенко¹   , В. И. Клишин¹  ,**
Е. С. Каган²  , Ю. Ф. Патраков¹  ¹ Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук (ФИЦ УУХ СО РАН), г. Кемерово, Российская Федерация² Кемеровский государственный университет, г. Кемерово, Российская Федерация nsm.nis@mail.ru**Аннотация**

В современных условиях российская угольная отрасль столкнулась с небывалым внешним давлением: это и введенные санкции, и необходимость соответствовать жестким экологическим требованиям, что неизбежно ведет к закрытию части предприятий, разрыву цепочек добавленной стоимости (ЦДС), сложившихся в угольной и смежных отраслях. Требуется сложная реструктуризация отрасли, для успешной реализации которой необходим надежный критерий, позволяющий оценивать перспективы долгосрочного развития как отдельных предприятий, так и ЦДС в целом. По мнению авторов, таким критерием является уровень стрессоустойчивости ЦДС.

Статья посвящена оценке долгосрочных перспектив развития угольной отрасли на основе стрессоустойчивости сложившихся в ней ЦДС и связанных с ними стратегий поведения угольных компаний. Авторы предложили алгоритм оценки стрессоустойчивости угольных ЦДС: описание особенностей и типологизация ЦДС, сложившихся в российской угольной отрасли; оценка их текущей стрессоустойчивости; описание стратегии выживания компаний, входящих в состав ЦДС; оценка перспектив сохранения ЦДС в условиях санкций. Соответственно, в статье приведены результаты оценки стрессоустойчивости 169 угольных компаний, действующих в рамках 110 отдельных ЦДС в период с 2010 по 2021 г.

Авторами произведена типологизация угольных ЦДС, что позволило выделить три базовых типа ЦДС в отечественной угольной отрасли: два интегрированных – посреднические и иерархические рыночные, и не интегрированный – рыночный. Анализ компаний, действовавших в период с 2010 по 2021 г., показал, что 90 из 169 предприятий (53 %) действовало в составе интегрированных компаний (иерархические и посреднические ЦДС), остальные 79 были отнесены к рыночным.

Для каждого из типов ЦДС были измерены общая стрессоустойчивость (β_{rescom}), которая показывает степень восстановления ЦДС после окончания шока; робастность (β_{res}) – способность ЦДС противостоять (поглощать) шокам; адаптивность (β_{rec}) – гибкость ЦДС и способность быстро восстанавливаться после шока. Проведенный авторами анализ показал, что уровень стрессоустойчивости ключевых сегментов угольной отрасли невысок, имеет тенденцию к падению и в перспективе будет только снижаться. В результате исследования выявлено, что в наиболее тяжелом положении находятся системообразующие компании, входящие в состав иерархических ЦДС, особенно энергоугольные, которые ориентированы преимущественно на внешние рынки, кооперативная стратегия выживания которых не обеспечивает поддержания даже текущей стрессоустойчивости. В более благоприятном положении находятся рыночные и отношенческие ЦДС. В итоге авторы делают вывод, что часть угольных компаний неизбежно закроется, а для другой части потребуется глубокая реструктуризация, при этом текущие стратегии выживания, выбранные компаниями, не позволят решить эту проблему самостоятельно и понадобится активное вмешательство со стороны государства.

Ключевые слова

угольная отрасль, стрессоустойчивость, цепочки добавленной стоимости (ЦДС), типичные ЦДС угольной отрасли, стратегии поведения компаний

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22–28–01803 (<https://rscf.ru/project/22-28-01803/>), грантов Минобрнауки России (№ 075-15-2022-1190 и № 075-15-2022-1197).

Для цитирования

Goosen E. V., Nikitenko S. M., Klishin V. I., Kagan E. S., Patravkov Y. F. Value chain stress resilience and behavioral strategies of companies in Russian coal industry. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2022;7(4):330–342. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-09-15>



EXPERIENCE OF MINING PROJECT IMPLEMENTATION

Research paper

Value chain stress resilience and behavioral strategies of companies in Russian coal industryE. V. Goosen¹  , S. M. Nikitenko¹   , V. I. Klishin¹  , E. S. Kagan²  , Y. F. Patrakov¹  ¹ Federal Coal and Coal Chemistry Research Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, city of Kemerovo, Russian Federation² Kemerovo State University, city of Kemerovo, Russian Federation nsm.nis@mail.ru**Abstract**

Under the current conditions, the Russian coal industry is under unprecedented external pressure: it is both the imposed sanctions and the need to meet strict environmental requirements that inevitably lead to the closure of part of the enterprises, the collapse of value chains (VCs) in the coal and related industries. As a result, a complex restructuring of the industry is required. To carry it out successfully, a reliable criterion is needed to assess the prospects for the long-term development of both individual companies and VCs as a whole. From the authors' point of view, the degree of stress resilience of VCs is the criterion needed.

The article deals with the evaluation of the long-term development prospects of the coal industry based on the established stress resilience of VCs and the related strategies of coal companies' behavior. The authors proposed an algorithm for assessing the stress resilience of VCs in the coal industry: a description of the aspects and typology of VCs in the Russian coal industry; an assessment of their current stress resilience; a description of the survival strategy of the companies included in the VCs; an assessment of the prospects for sustaining VCs under sanctions. Subsequently, this article presents the results of the stress resilience assessment of 169 coal companies operating in 110 different VCs between 2010 and 2021.

The authors created a typology of VCs in the coal industry, which makes it possible to identify three basic types of VCs in the domestic coal industry: two integrated – the captive market and the hierarchical market – and one non-integrated market. Analysis of companies operating from 2010 to 2021 showed that 90 out of 169 businesses (53%) operated as integrated companies (hierarchical and captive VCs), the remaining 79 were classified as market ones.

For each type we measured overall stress resilience (β_{rescom}), indicating the VC degree of recovery from shocks; robustness (β_{res}), the VC ability to withstand (swallow) shocks; adaptability (β_{rec}), the VC flexibility CDS and the ability to recover quickly after a shock. The analysis conducted by the authors showed that the stress resilience of key segments of the coal industry is low and tends to decrease and will only decrease in the long run. The research also found that systemically important companies are in the most difficult situation. They belong to the hierarchical VCs, especially the energy and coal companies, which are mainly focused on foreign markets. Their cooperative survival strategy does not even maintain the current level of stress resilience. Market and relational VCs are in a more favorable position. As a result, the authors conclude that part of the coal companies will inevitably close and for the other part a profound restructuring will be necessary, while the current survival strategies of the companies will not allow to solve this problem by themselves and an active participation of the state will be necessary.

Keywords

coal industry, stress resilience, value chains (VCs), typical coal industry VCs, company behavioral strategies

Acknowledgments

This research was supported by Russian Science Foundation grant No. 22-28-01803 (<https://rscf.ru/project/22-28-01803/>) and grants from the Russian Ministry of Education and Science (No. 075-15-2022-1190 and No. 075-15-2022-1197).

For citation

Goosen E. V., Nikitenko S. M., Klishin V. I., Kagan E. S., Patrakov Y. F. Value chain stress resilience and behavioral strategies of companies in Russian coal industry. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2022;7(4):330–342. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-09-15>

Введение

Российская угольная отрасль столкнулась с необходимостью адаптации к усиливающимся санкционным давлениям и жёстким экологическим требованиям. Только в рамках пятого пакета санкций Европейский союз запретил импорт и транзит угля и других твердых ископаемых видов топлива из России. Это затронуло 25 % всего российского экспорта

угля, что составляет около €8 млрд, и значительно ограничило спрос на российский уголь, добыча которого почти на 50 % ориентирована на внешние рынки [1].

Санкции приводят к разрыву сложившихся в угольной и смежных отраслях цепочек добавленной стоимости (ЦДС), что, в свою очередь, способствует формированию дополнительных рисков, оценка



и снижение которых невозможны без анализа стрессоустойчивости ЦДС.

Кроме того, анализ ЦДС является важным инструментом изучения процессов формирования и развития перспективных отраслей. В отличие от традиционного микро- и макроэкономического анализа рынков, анализ ЦДС имеет ярко выраженный динамический характер, он позволяет оценить долгосрочную устойчивость различных групп компаний угольной отрасли и выявить весь спектр потенциально доступных траекторий их развития, в том числе на основе «чистых» угольных технологий, ориентированных на создание конкурентоспособной продукции, определить возможные стратегии развития отрасли. По этой причине анализ ЦДС, ориентированный на поиск перспективных направлений их трансформации на основе выявления спектра доступных технологий, может стать действенным инструментом для разработки стратегий развития угледобывающих регионов.

1. Обзор современных подходов к стрессоустойчивости ЦДС

Концепт ЦДС и стрессоустойчивость как инструмент оценки перспектив их долгосрочного развития достаточно молоды. Поэтому, прежде чем давать оценку уровня стрессоустойчивости отечественных угольных ЦДС, необходимо уточнить понятия.

До 90-х годов XX в. базовой единицей анализа отрасли была компания. Однако активное формирование распределенной (сетевой) модели организации производства, опирающегося на подетальное разделение труда, привело к усилению технологической интеграции и стало основой формирования устойчивых межфирменных взаимодействий – цепочек добавленной стоимости (value chains, VC). Последние стали играть ведущую роль в обеспечении конкурентоспособности как отдельных компаний, так и отраслей в целом, что и привело к появлению концепции ЦДС [2–4]. Наиболее известным является определение ЦДС, данное Тимоти Стердженом: «цепочки добавленной стоимости – это полный набор действий, который необходим для того, чтобы осуществить продвижение продукта от момента возникновения его концепции до конечного потребителя через все стадии производства, включая разработку и дизайн, обеспечение поставок сырья и промежуточных компонентов, собственно производство, маркетинг и организацию сбыта, а также обеспечение послепродажного обслуживания» [5]. Современные ЦДС крайне многообразны, они используют различные преимущества технологической кооперации, организационного взаимодействия компаний, поэтому в рамках концепта ЦДС очень много направлений, использующих не только разные термины для определения ЦДС, но и отличающиеся понятия [6, 7].

В современной литературе существует несколько подходов, использующих близкие понятия для обозначения ЦДС и описывающих разные ее стороны. Так, М. Портер, 1985; Gereffi, 1994 [8, 9] используют понятие «товарные цепочки» (commodity chain) и понимают под ними этапы создания продукта в рамках

отдельных компаний, представленные основными и вспомогательными видами деятельности. В технических исследованиях, анализирующих возможности альтернативного использования промежуточной продукции и/или промышленной переработки ресурса/отходов, ЦДС называются технологическими цепочками. В исследованиях, изучающих возможности снижения себестоимости конечной продукции за счет реинжиниринга производственных процессов, внутрифирменных и межфирменных логистических решений, ЦДС – это цепочки поставок (supply chain) [10]. К этому подходу близки исследования цепочек создания стоимости (added value chain) и производственных сетей (production networks), описывающих, соответственно, последовательность этапов добавления стоимости продукта, начиная от добычи минеральных ресурсов и заканчивая готовым изделием, и организационные структуры ЦДС: ключевые типы игроков, механизмы управления цепочкой и характер взаимодействия компаний в цепочке поставок между собой и с внешней средой, в первую очередь с рынками, поддерживающей инфраструктурой и институтами [11–13]. Масштаб и структура ЦДС прослеживаются в понятиях «глобальная, локальная или национальная цепочка добавленной стоимости» (global value chain (GVC), domestic value chain (DVC) or local value chain (LVC) [14–17].

В любом случае, несмотря на различия в терминах, определяемых масштабом анализа и задачами исследования, все вышеуказанные подходы в рамках базовой модели ЦДС выделяют три ключевых взаимосвязанных компонента ЦДС:

- цепочку поставок, которая описывает ключевые блоки с точки зрения распределенного производства – ключевые производственные и сервисные этапы создания конечного товара или услуги;
- организационную модель ЦДС, которая выделяет ключевые организационные звенья цепочки, дает им описание и показывает связи между ними, характеризует центр принятия решений и способы управления;
- цепочку добавления стоимости, которая характеризует ЦДС с точки зрения способа формирования стоимости и ее распределения между основными звеньями ЦДС.

Эти три блока тесно связаны между собой и взаимно ограничивают друг друга. Ведущая роль принадлежит цепочкам поставок, так как они «представляют собой сложные системы, состоящие из организационной, информационной, финансовой, технологической, процессной, продуктовой и энергетической структур», и определяют базовые варианты построения ЦДС. Организационная модель и цепочка добавления стоимости сужают спектр доступных вариантов, определяя коммерчески успешные варианты [18].

Резкий рост турбулентности экономики привел еще к одной новации в исследованиях отраслей. Задачи изучения текущей конкурентоспособности стали вытесняться необходимостью изучения способности компаний и отраслей противостоять внутренним и внешним негативным факторам (шокам). Это при-



вело к появлению исследований, посвященных стрессоустойчивости ЦДС [18–20]. Стрессоустойчивость от классической конкурентоспособности отличается тем, что позволяет описать возможности устойчивого функционирования и модернизации ЦДС в условиях непрерывно меняющейся внешней среды. В докладе ОЭСР она определена как «способность системы гибко рекомбинировать свои элементы и ресурсы для достижения динамического равновесия либо на прежнем, либо на новом уровне развития в ответ на внезапные внешние или внутренние возмущения» [21].

Прежде чем перейти к оценке стрессоустойчивости российских угольных ЦДС, необходимо остановиться еще на одной проблеме. Угольная отрасль, как и большинство добывающих отраслей, очень «отстала» в формировании цепочек добавленной стоимости. Это связано с тем, что в отличие от обрабатывающих отраслей добывающие отрасли развивались преимущественно экстенсивно в рамках закрытых (анклавных) вертикально-интегрированных компаний на основе аддитивных цепочек поставок, представляющих собой серию необходимых последовательных стадий, которые невозможно осуществлять параллельно, – вся продукция предшествующего этапа направляется в последующие в качестве промежуточной. Основным источником конкурентоспособности угольных компаний было расширение масштаба деятельности на основе доступа к уникальным природным ресурсам и местоположению, поэтому строить ЦДС и выделять основные звенья, влияющие на уровень риска и особые источники конкурентоспособности, не было смысла. Процессы интенсификации добычи под воздействием истощения легкодоступных ресурсов и глобализации экономики привели к тому, что сквозная производительность цепочки создания стоимости от добычи угля до рынка стала реальным источником добавочной стоимости, что привело к росту интенсивности производства, повышению роли вспомогательных производств и услуг, усложнению структуры самих угольных компаний и установлению устойчивых связей с компаниями из смежных отраслей. Соответственно, это открыло возможности для содержательного изучения особенностей ЦДС и факторов их стрессоустойчивости в добывающих отраслях, в том числе угольной отрасли [22–26].

Авторы данной статьи используют понятие «цепочка добавленной стоимости» для обозначения базовой модели ЦДС, а понятие «цепочка поставок» (supply chain) – для обозначения технологической цепочки, и эти понятия опираются на понятие стрессоустойчивости ЦДС (Aldrighetti R. et al., 2021) как «способность фирмы противостоять сбоям, адаптироваться и восстанавливаться после сбоев, чтобы удовлетворить спрос клиентов, обеспечить целевую производительность и поддерживать операции в уязвимых средах» [18]. Применительно к угольной отрасли стрессоустойчивость означает способность отдельных угольных компаний и групп взаимосвязанных компаний предвидеть изменения и реагировать на них для выживания в краткосрочной перспективе (снижение издержек, формирование новых

технологических цепочек и т.д.), искать и реализовывать новые направления развития в долгосрочной перспективе (формирование новых цепочек поставок в условиях реализации концепции «Индустрия 4.0» и внешних вызовов: декарбонизация, санкционная политика, энергопереход и пр.).

2. Данные и методология исследования

В рамках данной статьи авторы предложили следующий алгоритм исследования стрессоустойчивости угольных ЦДС: описание особенностей и типологизация ЦДС, сложившихся в российской угольной отрасли; оценка их текущей стрессоустойчивости; описание стратегии выживания компаний, входящих в состав ЦДС; оценка перспектив сохранения ЦДС в условиях санкций.

С целью выявления типичных ЦДС в российской угольной отрасли авторами были проанализированы официальные данные Федеральной службы государственной статистики РФ, ЦДУ ТЭК, АО «Росинформуголь» и электронной системы «СБИС» о 169 компаниях, действующих в период с 2010 по 2021 г. Временной период был определен границами двух волн кризисов 2010–2017 и 2018–2021 гг.

Для типологизации угольных ЦДС была использована методология Gereffi, 2005, который выделил пять типов ЦДС: рыночные (markets), модульные (modular), отношенческие (relative), посреднические (captive values chains) и иерархические (hierarchy) [27]. Для уточнения характера связей компаний между собой и с компаниями из смежных отраслей были проведены интервью с пятью экспертами из числа топ-менеджеров, работающих в угольной отрасли. Это позволило на основе таких критериев, как структура цепочки поставок и организационная модель, выделить базовые типы, характерные для отечественной угольной отрасли, показать их особенности и стратегии выживания компаний, входящих в их состав. В результате из пяти базовых типов ЦДС, свойственных для угольной отрасли, было определено три типа ЦДС: рыночные, посреднические и иерархические.

Для оценки успешности, а также возможности придерживаться выбранной стратегии в дальнейшем в условиях санкций и потенциального эмбарго на поставки угля была проведена оценка стрессоустойчивости как ЦДС, так и входящих в их состав компаний, в периоды 2010–2017 и 2018–2021 гг. Для этого все 169 компаний были разделены на три большие группы ЦДС по степени близости к тому или иному типу базовой модели. В силу того что иерархические ЦДС демонстрировали разную стратегию выживания в зависимости от специализации, тип иерархических ЦДС был разбит еще на три подтипа. После этого была проведена оценка стрессоустойчивости выделенных ЦДС и входящих в их состав компаний на основе методики, предложенной Р. Мартином, который предложил оценивать стрессоустойчивость различных систем на основе коэффициентов стрессоустойчивости (β) [28]. В соответствии с данной методикой в каждом из выделенных типов и подтипов ЦДС были измерены: общая стрессоустойчивость (коэффициент общей



стрессоустойчивости – β_{rescom}), которая показывает степень восстановления ЦДС после окончания шока; робастность (коэффициент сопротивления – β_{res}), которая показывает способность ЦДС противостоять (поглощать шоки); адаптивность (коэффициент восстановления – β_{rec}), отражающая гибкость ЦДС и способность быстро восстанавливаться после шока.

Коэффициенты были рассчитаны для двух периодов: первый период с 2010 по 2017 г., второй период с 2018 по 2021 г. Периоды были определены на основе анализа динамики объемов добычи в отечественной угольной отрасли. Начало периода определялось на основе года, в который темпы прироста добычи были наиболее высокими. Год кризиса определялся на основе выявления года с самыми низкими темпами прироста или с самыми высокими темпами падения угледобычи. Год окончания периода – это год, когда темпы прироста добычи восстановились до исходного или демонстрировали самые высокие темпы прироста в период восстановления.

Все три коэффициента стрессоустойчивости рассчитывались по одной формуле:

$$\beta = \frac{\left[\frac{Q_t^c - Q_{t-1}^c}{Q_{t-1}^c} - \frac{Q_t^i - Q_{t-1}^i}{Q_{t-1}^i} \right]}{\left| \frac{Q_t^i - Q_{t-1}^i}{Q_{t-1}^i} \right|},$$

где Q_t^c – объем добычи угля в рамках группы ЦДС в рядовом исчислении, тыс. т; Q_t^i – объем добычи угля в отрасли в целом в рядовом исчислении, тыс. т; $(t - 1)$ для β_{rescom} и β_{res} – начальные годы предрецессионного шока (2010 и 2018 гг.); для β_{rec} – годы наибольшего падения объема добычи (2013 и 2019 гг.); t – для β_{rescom} и β_{rec} – годы выхода из рецессии (2017 и 2021 гг.); для β_{res} – годы пика падения объема добычи в отрасли (2013 и 2019 гг.).

Полученные результаты расчётов коэффициентов стрессоустойчивости для каждого из типов и подтипов ЦДС представлены в следующем разделе.

3. Особенности цепочек добавленной стоимости в отечественной угольной отрасли и уровень их стрессоустойчивости

Ресурсный характер угольной отрасли и особенности организации производства порождает специфику угольных ЦДС во всех трех компонентах. Как отмечают многие авторы [22–27], первичные затраты в угольной отрасли составляют существенную часть стоимости конечного продукта, они сильно варьируют в зависимости от специфических характеристик угольных активов и местоположения компании, поэтому не столько усовершенствования, сколько производственные потери определяют конечную величину добавленной стоимости угля. В силу зависимости от горно-геологических условий, качественного и количественного состава ресурсов в угольных цепочках большая часть добавленной стоимости приходится на стадию производства, включающую в себя подготовительные этапы, добычу и обогащение [24]. Доступ к природным ресурсам и наличие транспортной и ло-

гистической инфраструктуры во многом определяют размещение угледобывающих компаний, по этой причине угольная отрасль так и не смогла стать распределенной (distributed). Распределенное производство (distributed production) – это модель организации производства, в основе которого лежит подетальное разделение труда между узкоспециализированными работающими друг на друга участниками стоимостных цепочек (value chains). Процесс создания конечного продукта рассредоточен среди множества автономных фирм-поставщиков из разных стран и регионов, которые под руководством одной или нескольких ведущих компаний объединены в совместную проектную сеть ЦДС и выполняют в проекте свою узкую высокоспециализированную задачу (звено ЦДС), последовательно добавляя стоимость к конечному продукту на каждой стадии производственного цикла [19]. Цепочка поставок угольной отрасли по-прежнему укорочена и имеет достаточно простую (lean) аддитивную структуру [20, 22].

Авторы, занимающиеся управлением и организационными структурами угольных ЦДС, относят их к управляемым производителем, формирующимся сверху вниз [20, 22, 25, 26]. Большинство ЦДС относят к глобальным закрытым (анклавными) вертикально-интегрированным ЦДС иерархического типа (Glencore, BHP Biliton, Anglo American, СУЭК, Кузбассразрезуголь и др.) [25, 26]. Специалисты отмечают неустойчивость угольных ЦДС, особенно сильное негативное воздействие на них оказывают колебания цен и спроса на глобальных рынках [25, 26–31] и слабую восприимчивость к инновациям [26, 31].

Анализ компаний, действовавших в период с 2010 по 2021 г. показал, что 90 из 169 предприятий (53 %) действовало в составе интегрированных компаний (иерархические и посреднические ЦДС). Они были объединены в 13 ЦДС, состав которых был относительно постоянным. 79 предприятий были формально независимыми компаниями (рыночные ЦДС). Среди 43 компаний в составе иерархических ЦДС была определена следующая специализация: 6 компаний имеют энергоугольную направленность, 6 компаний имеют металлургическо-коксохимическую и 1 компания – цементную специализацию. Специализация определялась по наличию основного постоянного потребителя. 47 компаний вошли в состав 18 ЦДС посреднического типа – неспециализированных конгломератов и не имели явно выраженной специализации. Независимые компании не имели специализации и входили в состав ЦДС рыночной типа. Краткие описания, схемы типичных ЦДС в российской угольной отрасли и примеры приведены в табл. 1.

Приведенные данные наглядно показывают, что уровень как общей стрессоустойчивости, так и робастность и гибкость всех типов ЦДС снизились в период второй волны кризиса 2018–2021 гг., что говорит о том, что все выбранные стратегии поддержания конкурентоспособности и выживания нуждаются в корректировке. При этом в наихудшем положении с точки зрения стрессоустойчивости оказались иерар-

хические ЦДС, особенно те, которые имели энергоугольную специализацию.

После разбиения компаний на типы ЦДС для каждой из групп были рассчитаны индексы общей стрессоустойчивости, робастности и гибкости. Ниже в табл. 2 и на рис. 1 приведена динамика изменения индексов общей стрессоустойчивости, робастности (устойчивости) и гибкости в периоды 2010–2017 и 2018–2021 гг.

Для оценки полученных результатов значение индекса было сопоставлено с информацией о компаниях, полученной от экспертов. Это позволило оценить адекватность полученных данных, провести соответствие между типом ЦДС и бизнес-моделью входящих в их состав компаний, а также оценить и объяснить динамику уровня стрессоустойчивости угольных ЦДС в долгосрочной перспективе.

Таблица 1

Типичные ЦДС в российской угольной отрасли (N = 110)

Тип ЦДС / количество в выборке	Рыночный тип ЦДС (markets)	Посреднический тип ЦДС (captive values chains)	Иерархический тип ЦДС (hierarchy)
Количество ЦДС в выборке	79	18	13
Число выживших (действовавших в течение всего периода 2010–2021 гг.)	16	17	13
Структура цепочки поставок	Угольные цепочки поставок, включающие в себя только производственные звенья: разведку и подготовку к добыче, добычу и обогащение	Угольные цепочки поставок, объединенные вокруг центра принятия решений, выполняющего вспомогательные функции: маркетинговые, логистические, транспортные и др.	Угольные и неугольные цепочки поставок (энергетические, металлургические, цементные), подчиненные центру принятия решений, выполняющему вспомогательные функции: НИР, маркетинговые, логистические, транспортные и др.
Схема ЦДС	<p>Неспециализированные независимые угледобывающие компании</p> <p>Неспециализированные потребители угля</p>	<p>Неспециализированные независимые угледобывающие компании</p> <p>Неспециализированные потребители угля</p>	<p>Интегрированные в рамках фирмы специализированные производители и потребители угля</p> <p>Специализированные независимые потребители</p>
Организационная структура	Независимые неспециализированные компании	Группа неспециализированных транзакционно зависимых от крупных покупателей компаний – сбытовых и управляющих центров в форме крупной управляющей или крупной добывающей компании	Закрытая вертикально-интегрированная структура, опирающаяся на товарную интеграцию входящих в нее зависимых компаний, образующих внутри вертикальной структуры специализированные цепочки поставок (энергоугольные, металлургическо-коксохимические, цементные)
Примеры ЦДС	ООО р. Кайчакский-1; АО р. Канский; ФГУП ГТ Арктикуголь; ОАО ш. Угольная	ООО «Холдинг СИБУГЛЕМЕТ»; АО ХК «СДС-УГОЛЬ»; ООО «УК «КОЛМАР»	АО СУЭК; ПАО Северсталь; ПАО Мечел; EN+ GROUP; АО «ХК «СИБИРСКИЙ ЦЕМЕНТ»

Источник: составлено авторами на основе адаптированной схемы Gereffi, 2005, данных ЦДУ ТЭК, базы данных системы «СБИС».

Таблица 2

Динамика индексов стрессоустойчивости основных типов ЦДС российских угольных компаний в 2010–2021 гг.

Специализация и тип ЦДС	2010–2017			2018–2021		
	Общая β_{rescom}	Робастность β_{res}	Гибкость β_{rec}	Общая β_{rescom}	Робастность β_{res}	Гибкость β_{rec}
Металлургическо-коксохимические иерархические	-0,04	0,18	-0,16	0,07	0,05	-0,05
Энергоугольные иерархические	5,23	13,74	-0,11	-5,01	-0,06	-1,80
Цементные иерархические	1,59	0,62	1,93	0,28	-1,02	1,80
Неспециализированные «захватнические»	2,68	3,94	1,30	1,22	-0,10	0,61
Неспециализированные рыночные	0,62	0,78	0,45	12,18	0,53	3,61

Источник: расчеты авторов на основе данных ЦДУ ТЭК.

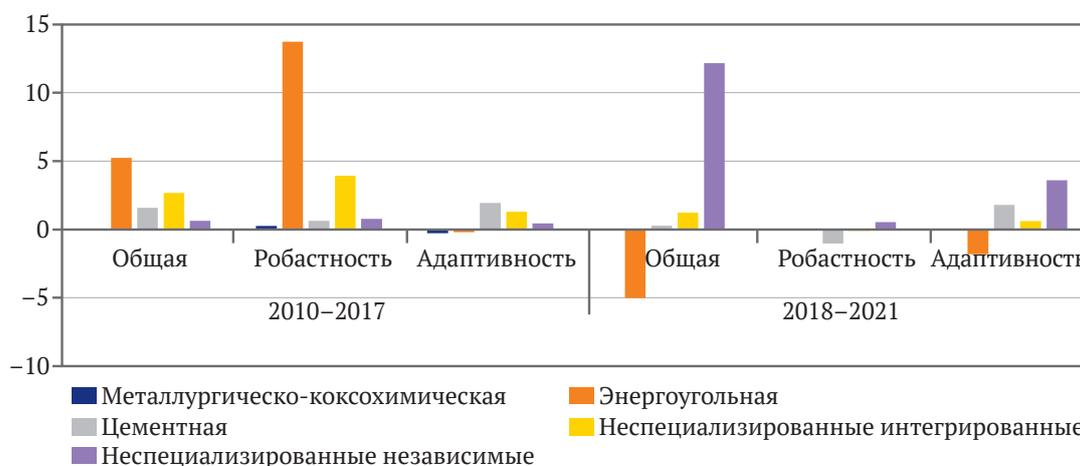


Рис. 1. Динамика индексов стрессоустойчивости основных типов ЦДС российских угольных компаний в 2010–2021 гг. (Источник: расчеты авторов на основе данных ЦДУ ТЭК)

4. Бизнес-модели российских угольных ЦДС и перспективы их выживания в условиях санкций

Рыночный тип ЦДС в отечественной угольной отрасли представлен небольшими независимыми неспециализированными (не имеющими одного ключевого потребителя) компаниями. Они, как правило, неустойчивы, срок их жизни гораздо короче среднего 15-летнего инвестиционного жизненного цикла угольной отрасли и составляет около 5 лет. Из 79 компаний, отнесенных к этому типу, в течение всего анализируемого периода непрерывно вело деятельность всего 16 (менее 10 %). Большинство компаний имеют невысокий уровень рентабельности или вообще не покрывают свои затраты. Так, в 2020 г., в самый разгар второй волны кризиса, по данным ЦДУ, только 12 компаний, образующих рыночные ЦДС, были прибыльными, при этом наличие прибыли во многих случаях поддерживалось госзаказами. Показательно, что к 2021 г. 4 из этих 12 компаний уже объявили себя банкротами. Эти данные позволяют сделать вывод, что большинство независимых компаний придерживаются стратегии выживания: быстро входят на рынок в период подъема отрасли и также быстро уходят с рынка в периоды ухудшения рыночной конъюнктуры.

Часть компаний в период подъема с целью получения доступа к внешнему рынку формально и неформально входит в состав посреднических ЦДС, балансируя таким образом объем продаж.

Именно стратегия выживания объясняет необычную динамику индексов текущей стрессоустойчивости этих компаний. Относительно невысокий уровень стрессоустойчивости 0,62 в период 2010–2017 гг. резко вырос до 12,18 в период 2018–2021 гг. Это связано с тем, что восстановление после первой волны кризиса в 2013–2017 гг. обеспечивалось приростом объема добычи в крупных компаниях за счет роста спроса на внешних рынках. В этих условиях рыночная ниша независимых компаний была невелика и не позволила обеспечить необходимую гибкость. В период шока второй волны 2020–2021 гг., наоборот, восстановление объема добычи шло за счет роста поставок на внутренние рынки и обеспечивалось независимыми компаниями. Крупные интегрированные компании придерживались более сдержанной политики относительно увеличения объема добычи и в меньшей степени увеличили добычу угля.

Важно также отметить, что несмотря на столь впечатляющую положительную динамику абсолютный прирост добычи за счет независимых компаний



был небольшим, поэтому их вряд ли можно рассматривать как основу для стабилизации и роста стрессоустойчивости отрасли в целом. Важно отметить, что и независимость рыночных компаний зачастую носила чисто формальный характер. В рамках стратегии выживания они часто прибегали к разного рода неформальным кооперативным стратегиям: заключали соглашения о поставках между собой, входили и выходили из состава посреднических и иерархических ЦДС, активно пользовались господдержкой и участвовали в выполнении госзаказов. Важно также отметить, что именно рыночные ЦДС с целью выживания использовали процедуры банкротства с целью снижения кредитных обязательств. Оценивая перспективы рыночных ЦДС в свете эмбарго на поставки угля можно отметить, что несмотря на то что они в 2018–2021 гг. и обеспечили относительно высокую текущую устойчивость угольной отрасли, вряд ли сами по себе смогут выполнять эту задачу в долгосрочной перспективе вне рамок прозрачной кооперации с другими компаниями.

К посредническим ЦДС авторы статьи отнесли цепочки добавленной стоимости, образованные разными по размеру компаниями, интегрированными вокруг сбытовых и управляющих центров, в качестве которых выступают крупные управляющие или крупные добывающие компании, работающие как на внешнем, так и на внутреннем рынке. Они играют роль интегративного центра, выполняют функции центра принятия решений и оказывают входящим в их состав компаниям финансовые, логистические, маркетинговые и транспортные услуги. Отношения между компаниями, входящими в посреднические ЦДС, опираются на товарную интеграцию (продажа сходного товара), поэтому сама интеграция имеет неустойчивый характер – является конгломератом, который, однако, устойчивее рыночных ЦДС. Выход на рынок через централизованную сбытовую компанию позволяет компаниям, входящим в посреднические ЦДС, диверсифицировать сбыт и сделать спрос на добываемый уголь более устойчивым, лучше контролировать цены, выходить на широкий круг крупных потребителей, в том числе за рубежом. Поэтому в период с 2010 по 2021 г., несмотря на изменение состава компаний, входящих в состав конкретных посреднических ЦДС, только 1 из 18 ЦДС прекратила свое существование.

Интересна динамика индексов стрессоустойчивости этой группы ЦДС, которая противоположна рыночным ЦДС. Стрессоустойчивость была относительно высокой в первую волну кризиса и резко упала во вторую. Во многом это объясняется стратегией поддержания конкурентоспособности, к которой прибегали компании, входящие в ЦДС посреднического типа. В период 2010–2017 гг. они придерживались стратегии приобретения (включения в состав ЦДС) новых компаний и сохранения ядра ЦДС, состоящего из наиболее прибыльных компаний, имеющих премиальные марки углей. Целью приобретения новых активов было обеспечение контроля над рынком. Такая стратегия особенно успешно «работала» на вну-

тренем рынке. Стрессоустойчивость ЦДС на первом этапе во многом обеспечивалась государственной поддержкой. Неспециализированные конгломераты создавались с участием как частных компаний, так и государственных институтов развития. Примерами последних являются Госкорпорация «РОСАТОМ» и Корпорация развития Иркутской области. Однако товарная интеграция и зависимость от головной компании не позволили компаниям, входящим в состав посреднической ЦДС, поддерживать долговременную стрессоустойчивость, что и сказалось во время второй волны.

Оценивая бизнес-стратегию посреднических ЦДС и перспективы их долговременной стрессоустойчивости, важно отметить, что для них сохраняются многие риски, свойственные рыночным ЦДС. Их стрессоустойчивость резко снижается в период спада, но быстрее восстанавливается в период подъема, когда прибыль растет быстрее затрат. При этом и текущая, и долговременная стрессоустойчивость ниже и снижается быстрее, если в роли сбытового центра выступает крупная добывающая компания. Это можно объяснить тем, что положение небольших зависимых компаний, входящих в состав посреднических ЦДС, схоже с положением независимых компаний: они стабилизируют для головной компании рынок, снижая риски и издержки в период спада, и легко включаются в состав ЦДС в период подъема и наращивают производство. При этом именно на небольшие компании перекадываются риски и затраты. Особенно наглядно это видно в период второй волны кризиса, когда головные компании выбирали стратегию отказа от проблемных компаний, входящих в состав конгломерата в период падения цен, и, наоборот, активно включали в свой состав новые небольшие компании в период роста цен. Можно сказать, что бизнес-стратегия выживания в период кризиса и стрессоустойчивость посреднических ЦДС так же, как и стрессоустойчивость рыночных ЦДС, поддерживалась за счет нестабильности входящих в их состав компаний. Сложность реализации такой стратегии в период второй кризисной волны и привела к снижению всех коэффициентов стрессоустойчивости. В условиях эмбарго на поставки угля можно ожидать сохранения этой тенденции и дальнейшего снижения стрессоустойчивости данного вида ЦДС, а также сокращения их общего числа. Это вероятнее всего приведет к росту числа неустойчивых рыночных ЦДС, образуемых за счет разрыва кооперативных связей. Тем не менее, по мнению авторов, в этом случае можно ожидать меньшего негативного воздействия санкций на данный сегмент угольной отрасли.

В группу иерархических ЦДС были включены специализированные закрытые вертикально-интегрированные холдинги, организованные на основе аддитивного производства. В составе выборки их оказалось 13. В отличие от ЦДС первой и второй группы в составе таких ЦДС имеется широкий спектр вспомогательных служб и производств: кадровые службы, собственные научно-исследовательские и образовательные организации, сервисные, инжиниринговые,



транспортно-логистические, сбытовые финансовые подразделения, которые позволяют эффективно управлять персоналом, поддерживать долговременную стрессоустойчивость компаний за счет технологических нововведений, управления рынком и сбытом, оптимизировать логистические схемы и экономить на транспортных расходах. Финансовые и сбытовые службы координируют и контролируют деятельность подразделений компаний, выступая в качестве центра принятия решений.

Значительную роль в устойчивости иерархических ЦДС играют диверсификация сбыта и значительные масштабы поставок. Большая часть системообразующих угольных компаний входит в состав иерархических ЦДС. Монопольное положение на рынке позволяет компаниям гибко реагировать на внешние и внутренние шоки, в том числе за счет сокращения объема добычи. Наличие собственной транспортно-логистической системы позволяет компаниям нивелировать колебания конъюнктуры рынка и перебрасывать поставки с одного рынка на другой. Значения коэффициентов стрессоустойчивости показывают, что в период 2010–2017 гг. компаниями была выбрана оптимальная бизнес-стратегия: диверсификация сбыта и значительные масштабы поставок обеспечивали возможность поглощать внешние и внутренние шоки (коэффициент робастности β_{res} был самым высоким – 13,74). Однако уже в этот период для иерархических ЦДС была характерна низкая гибкость (коэффициент адаптивности β_{rec} был отрицательным – –0,11). Большую роль в обеспечении стрессоустойчивости компаний играли их статус системообразующих и тесные контакты с федеральными и региональными органами власти. Однако, когда в период кризиса второй волны резко возросло влияние распределённого производства с ориентацией на ресурсы с заранее заданными свойствами, стрессоустойчивость иерархических ЦДС стала резко падать. Их закрытость, зависимость от внешних рынков и стремление погасить влияние кризиса за счет контроля объемов добычи и цен привели к резкому снижению общей стрессоустойчивости. Индекс общей стрессоустойчивости β_{recom} упал сразу на 10 единиц – с 5,23 до –5,01.

Анализ показал, что выбор стратегии и долгосрочная стрессоустойчивость иерархических ЦДС прямо коррелируют со специализацией цепочек. Так, компании, представляющие собой металлургические и цементные холдинги, имели невысокую стрессоустойчивость в течение обоих периодов (близкую к среднеотраслевой). Это во многом объясняется подчиненным положением угольных компаний в составе холдингов, жесткой привязкой их к основному потребителю и перераспределением финансовых потоков в пользу основного, неугольного производства. В период первой кризисной волны иерархические ЦДС металлургической и цементной специализации за счет относительно низкой себестоимости добычи угля легче приспособились к снижению цен и меньше, чем в среднем в отрасли, снизили объемы добычи угля. Входящие в их состав угольные предприятия

являлись низшим самостоятельным звеном ЦДС, жестко привязанным к конкретным металлургическим или цементным предприятиям. Внутренние цепочки поставок были частью политики диверсификации, опирающейся на товарную интеграцию, а также средством защиты от падения выручки в кризисные периоды. Металлургическим и цементным ЦДС удалось сохранить в своем составе угольные активы.

Наоборот, в период кризисной волны 2018–2021 гг., когда уровень себестоимости приблизился к среднеотраслевой, с целью снижения затрат такие компании были вынуждены начать избавляться от угольных активов как непрофильных. Кроме того, именно во вторую волну распределенное производство стало активно проникать в металлургическую и цементную отрасли. От ЦДС все чаще стали требоваться металл и цемент с заранее заданными свойствами, соответственно стали ужесточаться требования и к качеству угля. Прежние угольные активы не всегда соответствовали этим требованиям, а товарная интеграция как инструмент диверсификации деятельности и защиты от рисков перестала выполнять свою роль. Показательно, что компании отказывались от угольных активов не в период спада, а в период восстановления, когда цены и объемы спроса на уголь начали быстро расти.

В качестве примера можно привести ЦДС в ПАО «Северсталь» и ЕВРАЗ. Акционеры горно-металлургической компании «Северсталь» в начале декабря 2021 г. подписали обязывающее соглашение с ООО «Русская энергия» о продаже компании «Воркутауголь». Компания ЕВРАЗ в декабре 2021 г. передала угольные активы (семь шахт, два разреза и три обогатительные фабрики в Кемеровской области и одну шахту в Туве) в угольную компанию «Распадская» и начала процедуру выделения ее в самостоятельный бизнес¹. Санкции, введенные в отношении акционеров ЕВРАЗ, приостановили этот процесс. Тем не менее можно констатировать, что именно отказ от части угольных активов позволил металлургическим ЦДС быстрее восстановиться в условиях подъема и удержать значение индекса общей стрессоустойчивости в 2018–2021 гг. в границах положительных значений, соответственно 0,07 и 0,28. Однако эти значения невелики, а с учетом распространения распределенного производства и неопределенности долгосрочной стратегии металлургических ЦДС они вряд ли компенсируют отрицательную стрессоустойчивость всех специализированных ЦДС, особенно энергоугольных, в которых наблюдается наибольший спад спроса на уголь. Все это позволяет сделать вывод о том, что кооперация обеспечивает поддержание более высокого уровня текущей стрессоустойчивости ЦДС, однако в долгосрочном периоде сохранение текущих бизнес-стратегий металлургических ЦДС может привести к ее снижению.

¹ Металлурги дистанцируются от угля. Акционеры ЕВРАЗа одобрили выделение Распадской. Neftegas.ru, 11 янв. 2022. URL: <https://neftegaz.ru/news/coal/720353-metallurgidistantisiruyutsya-ot-uglya-aktsionery-evraza-odobrili-vydelenie-raspadskoy/> (Дата обращения: 22.02.2022)



В отличие от металлургических и цементных ЦДС энергоугольные ЦДС всегда были ориентированы на глобальные угольные рынки, поэтому предприятия и дивизионы, занятые добычей угля, играли и играют в них ведущую роль. Центр управления и финансовый центр часто располагаются в угледобывающем или сбытовом дивизионе компании. Проведение кооперативной стратегии позволяло аккумулировать и перераспределять значительную часть доходов в пользу угольного дивизиона и активно развивать его. Это обеспечило энергоугольным холдингам высокий уровень стрессоустойчивости в период 2010–2017 гг. Коэффициенты общей стрессоустойчивости и робастности в этой группе компаний были самыми высокими в отрасли, соответственно 5,23 и 13,74. Однако зависимость от внешних рынков привела к тому, что уже во второй волне кризиса все коэффициенты стали отрицательными, а общая стрессоустойчивость – самой низкой в отрасли –5,01. В условиях эмбарго на продажу российского угля стратегия энергоугольных ЦДС является самой уязвимой и положительные эффекты кооперативной стратегии вряд ли смогут сгладить негативное воздействие сокращения внешнего спроса. Поэтому в перспективе можно ожидать дальнейшего падения как текущей, так и долгосрочной стрессоустойчивости, что может привести к закрытию части компаний, входящих в состав энергоугольных ЦДС, что недопустимо с учетом доли системообразующих компаний в составе энергоугольных ЦДС, а также возможности преобразования самих ЦДС в более простые отношенческие и рыночные.

Выводы

Проведенный анализ показал, что угольная отрасль находится в тяжелом положении, уровень стрессоустойчивости ее ключевых сегментов невысок, имеет тенденцию к падению и в перспективе будет только снижаться. В наиболее тяжелом положении находятся системообразующие компании, входящие в состав иерархических ЦДС, особенно энергоугольные, которые

были ориентированы преимущественно на внешние рынки, кооперативная стратегия выживания которых не обеспечивает поддержания даже текущей стрессоустойчивости. В более благоприятном положении находятся рыночные и отношенческие ЦДС. Однако показатель объема добычи угля, неустойчивость самих ЦДС не в состоянии обеспечить надежное развитие угольной отрасли. Все это позволяет сделать вывод о том, что часть угольных компаний неизбежно закроются, а для другой части потребуются глубокая реструктуризация. При этом текущие стратегии выживания, выбранные компаниями, не позволяют решить эту проблему самостоятельно и требуют активного вмешательства со стороны государства. На первом этапе государственная поддержка может быть направлена на поддержание спроса на уголь для системообразующих компаний за счет переориентации экспорта угля в восточном направлении, развитие транспортной инфраструктуры, но в долгосрочной перспективе стрессоустойчивость ЦДС и угольной отрасли в целом может быть обеспечена только за счет развития кооперативных связей на основе технологической интеграции, обеспеченной долговременной государственной поддержкой. В основу этой интеграции могут быть положены перспективные технологии низкоуглеродной энергетики, ориентированные на производство топливных смесей с заданными свойствами; цифровые технологии, направленные на обеспечение эффективной логистики и поддержание безопасности; роботизированные комплексы, обеспечивающие безопасность и высокую производительность благодаря внутренней кооперации с предприятиями машиностроительной отрасли. Именно такие технологии сделают кооперативные связи более устойчивыми, а кооперативную стратегию менее затратной и более эффективной. Такой подход, по мнению авторов, позволит начать внедрять элементы распределенного производства в угольные ЦДС и обеспечить развитие отрасли и её стрессоустойчивость в долговременной перспективе.

Список литературы

1. Петренко И.Е., Шишкин В.К. Итоги работы угольной промышленности России за январь – март 2022 года. *Уголь*. 2022;(6):6–16. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2022-6-6-16>
2. Смородинская Н.В., Катуков Д.Д. Распределенное производство в условиях шока пандемии: уязвимость, резильентность и новый этап глобализации. *Вопросы экономики*. 2021;(12):21–47. <https://doi.org/10.32609/0042-8736-2021-12-21-47>
3. Яценко В.А., Крюков Я.В. Фрагментация и консолидация производственных цепочек в мировой редкоземельной промышленности. *Горная промышленность*. 2022;(1):66–74. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-1-66-74>
4. Кондратьев В., Попов В., Кедрова Г. Промышленная политика в условиях индустрии 4.0. *Мировая экономика и международные отношения*. 2022;66(3):73–80. <https://doi.org/10.20542/0131-2227-2022-66-3-73-80>
5. Sturgeon T.J. How do we define value chains and production networks? *IDS Bulletin*. 2001;32(3):9–18. <https://doi.org/10.1111/j.1759-5436.2001.mp32003002.x>
6. Park A., Nayyar G., Low P. *Supply chain perspectives and issues – a literature review*. Geneva and Hong Kong: Fung Global Institute and World Trade Organization; 2013. 232 p. URL: https://www.wto.org/english/res_e/booksp_e/aid4tradesupplychain13_e.pdf
7. Kaplinsky R. Spreading the gains from globalization: what can be learned from value-chain analysis? *Problems of Economic Transition*. 2004;47(2):74–115. <https://doi.org/10.1080/10611991.2004.11049908>



8. Портер М. *Конкурентное преимущество. Как достичь высокого результата и обеспечить его устойчивость*. М.: Альпина Бизнес Букс; 2008.
9. Gereffi G. The organization of buyer-driven global commodity chains: how U.S. retailers shape overseas production networks. In: *Commodity Chains and Global Capitalism. Chapter 5*. Westport, London: Praeger; 1994. Pp. 95–122.
10. Harrison T., Lee H., Neale J. *The practice of supply chain management: where theory and application converge*. Springer US; 2003. 357 p.
11. Gereffi G., Humphrey J., Sturgeon T. *Proposal for value chain meeting*. Brighton: Institute of Development Studies, University of Sussex; 2000.
12. Thomas H. Governing Global Production Networks in the new economy. In: Wilkinson A., Barry M. (Eds.) *The Future of Work and Employment*. Edward Elgar Publishing; 2020. Pp. 189–203. <https://www.eelgar.com/shop/gbp/the-future-of-work-and-employment9781786438249.html>
13. Смородинская Н.В., Катуков Д. Распределенное производство и «умная» повестка национальных экономических стратегий. *Экономическая политика*. 2017;12(6):72–101. <https://doi.org/10.18288/1994-5124-2017-6-04>
14. Gereffi G., Humphrey J., Kaplinsky R., Sturgeon T. J. Introduction: globalisation, value chains and development. *IDS Bulletin*. 2001;32(3):1–8. <https://doi.org/10.1111/j.1759-5436.2001.mp32003001.x>
15. Авдашева С.Б., Буданов И.А., Голиков В.В., Яковлев А.А. Модернизация российских предприятий в цепочках создания стоимости (на примере трубной и мебельной промышленности России). *Экономический журнал ВШЭ*. 2005;9(3):361–377. URL: https://ej.hse.ru/data/2010/12/31/1208183448/09_03_04.pdf
16. Кондратьев В. Мировая экономика как система глобальных цепочек стоимости. *Мировая экономика и международные отношения*. 2015;(3):5–17. <https://doi.org/10.20542/0131-2227-2015-3-5-17>
17. Мешкова Т., Моисеичев Е. Анализ глобальных цепочек создания стоимости: возможности Форсайт-исследований. *Форсайт*. 2016;(1):69–82. <https://doi.org/10.17323/1995-459x.2016.1.69.82>
18. Aldrichetti R., Battini D., Ivanov D., Zennaro I. Costs of resilience and disruptions in supply chain network design models: a review and future research directions. *International Journal of Production Economics*. 2021;235:108103. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2021.108103>
19. Смородинская Н.В., Катуков Д.Д. Глобальные стоимостные цепочки: как поднять резильентность перед внезапными шоками? *Контуры глобальных трансформаций: политика, экономика, право*. 2020;(6):30–50. <https://doi.org/10.23932/2542-0240-2020-13-6-2>
20. Кондратьев В., Попов В., Кедрова Г. Трансформация глобальных цепочек стоимости: опыт трех отраслей. *Мировая экономика и международные отношения*. 2020;64(3):68–79. <https://doi.org/10.20542/0131-2227-2020-64-3-68-79>
21. MacLeman H., Miller A.M., Marty L. *Resilience systems analysis: Learning and recommendations report*. Paris: OECD Publishing; 2017. 88 p. URL: https://www.oecd.org/dac/conflict-fragility-resilience/docs/SwedenLearning_Recommendationsreport.pdf
22. Floris L.M., Calegario C.L., Ávila E., Caetano R.M. Determinant factors of insertion in global value chains: an analysis of the mining industry participation. *International Business*. 2020;15(3):80–102. <https://doi.org/10.18568/internext.v15i3.583>
23. Pietrobelli C., Marin A., Olivari J. Innovation in mining value chains: New evidence from Latin America. *Resources Policy*. 2018;58:1–10. URL: <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2018.05.010>
24. *Особенности процесса глобализации в отраслях и комплексах мировой экономики*. Под ред. В.Б. Кондратьева. М.: ИМЭМО РАН; 2020. 245 с. URL: <https://www.imemo.ru/files/File/ru/publ/2020/2020-005.pdf>
25. Вдовин А.Н. Особенности цепочек создания стоимости в предприятиях топливно-энергетического комплекса России. *Управление экономическими системами*. 2011;(33):1–13.
26. Никитенко С.М., Гоосен Е.В. Цепочки добавленной стоимости как инструмент развития угольной отрасли. *ЭКО*. 2017;(9):104–124. URL: <https://ecotrends.ru/index.php/eco/article/view/1365>
27. Gereffi G., Humphrey J., Sturgeon T. The governance of global value chains. *Review of International Political Economy*. 2005;12(1):78–104. <https://doi.org/10.1080/09692290500049805>
28. Martin R. Regional economic resilience, hysteresis and recessionary shocks. *Journal of Economic Geography*. 2012;12(1):1–32. <https://doi.org/10.1093/jeg/1br019>
29. Goosen E.V., Nikitenko S.M., Kagan E.S., Pakhomova E.O. Evolution of VAC in the context of coal industry advance in the conditions of digitization in Russia. *Eurasian Mining*. 2019;(2):36–40. <https://doi.org/10.17580/em.2019.02.08>
30. Felice G., Lamperti F., Piscitello L. The employment implications of additive manufacturing. *Industry and Innovation*. 2022;29(3):333–366. <https://doi.org/10.1080/13662716.2021.1967730>
31. Iizuka M., Pietrobelli C., Vargas F. Innovation in mining global value chains: implications for emerging economies. In: Daly A., Humphreys D., Raffo J., Valacchi G. (eds.) *Global Challenges for Innovation in Mining Industries*. Cambridge University Press; 2022. Pp. 88–116. <https://doi.org/10.1017/9781108904209.005>



References

1. Petrenko I.E., Shinkin V.K. Russia's coal industry performance for January – March, 2022. *Ugol'*. 2022;(6):6–16. (In Russ.) <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2022-6-6-16>
2. Smorodinskaya N.V., Katukov D.D. Distributed production under the pandemic shock: Vulnerability, resilience and the new stage of globalization. *Voprosy Ekonomiki*. 2021;(12):21–47. (In Russ.) <https://doi.org/10.32609/0042-8736-2021-12-21-47>
3. Yatsenko V.A., Kryukov Y.V. Fragmentation and consolidation of production chain in the global rare earth industry. *Russian Mining Industry*. 2022;(1):66–74. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-1-66-74>
4. Kondrat'ev V., Popov V., Kedrova G. Industrial policy priorities under industry 4.0. *World Economy and International Relations*. 2022;66(3):73–80. (In Russ.) <https://doi.org/10.20542/0131-2227-2022-66-3-73-80>
5. Sturgeon T.J. How do we define value chains and production networks? *IDS Bulletin*. 2001;32(3):9–18. <https://doi.org/10.1111/j.1759-5436.2001.mp32003002.x>
6. Park A., Nayyar G., Low P. *Supply chain perspectives and issues – a literature review*. Geneva and Hong Kong: Fung Global Institute and World Trade Organization; 2013. 232 p. URL: https://www.wto.org/english/res_e/booksp_e/aid4tradesupplychain13_e.pdf
7. Kaplinsky R. Spreading the gains from globalization: what can be learned from value-chain analysis? *Problems of Economic Transition*. 2004;47(2):74–115. <https://doi.org/10.1080/10611991.2004.11049908>
8. Porter M. *Competitive advantage. How to achieve a high result and ensure its stability*. Moscow: Alpina Business Books; 2008.
9. Gereffi G. The organization of buyer-driven global commodity chains: how U.S. retailers shape overseas production networks. In: *Commodity Chains and Global Capitalism. Chapter 5*. Westport, London: Praeger; 1994. Pp. 95–122.
10. Harrison T., Lee H., Neale J. *The practice of supply chain management: where theory and application converge*. Springer US; 2003. 357 p.
11. Gereffi G., Humphrey J., Sturgeon T. *Proposal for value chain meeting*. Brighton: Institute of Development Studies, University of Sussex; 2000.
12. Thomas H. Governing Global Production Networks in the new economy. In: Wilkinson A., Barry M. (Eds.) *The Future of Work and Employment*. Edward Elgar Publishing; 2020. Pp. 189–203. <https://www.eelgar.com/shop/gbp/the-future-of-work-and-employment9781786438249.html>
13. Smorodinskaya N. V., Katukov D. D. Dispersed model of production and smart agenda of national economic strategies. *Ekonomicheskaya Politika*. 2017;12(6):72–101. (In Russ.) <https://doi.org/10.18288/1994-5124-2017-6-04>
14. Gereffi G., Humphrey J., Kaplinsky R., Sturgeon T. J. Introduction: globalisation, value chains and development. *IDS Bulletin*. 2001;32(3):1–8. <https://doi.org/10.1111/j.1759-5436.2001.mp32003001.x>
15. Avdasheva S., Budanov I., Golikova V., Yakovlev A. Modernization of Russian enterprises: the value chain perspective. The case study of tube&pipe and furniture sectors. *Higher School of Economics Economic Journal*. 2005;9(3):361–377. (In Russ.) URL: https://ej.hse.ru/data/2010/12/31/1208183448/09_03_04.pdf
16. Kondrat'ev V. World economy as global value chain's network. *World Economy and International Relations*. 2015;(3):5–17. (In Russ.) <https://doi.org/10.20542/0131-2227-2015-3-5-17>
17. Meshkova T., Moiseichev E. Foresight applications to the analysis of global value chains. *Foresight and STI Governance*. 2016;(1):69–82. <https://doi.org/10.17323/1995-459x.2016.1.69.82>
18. Aldrighetti R., Battini D., Ivanov D., Zennaro I. Costs of resilience and disruptions in supply chain network design models: a review and future research directions. *International Journal of Production Economics*. 2021;235:108103. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2021.108103>
19. Smorodinskaya N.V., Katukov D.D. Global value chains: how to enhance resilience under sudden shocks? *Outlines of Global Transformations: Politics, Economics, Law*. 2020;(6):30–50. (In Russ.) <https://doi.org/10.23932/2542-0240-2020-13-6-2>
20. Kondrat'ev V., Popov V., Kedrova G. Global value chains transformation: three industries' cases. *World Economy and International Relations*. 2020;64(3):68–79. (In Russ.) <https://doi.org/10.20542/0131-2227-2020-64-3-68-79>
21. MacLeman H., Miller A.M., Marty L. *Resilience systems analysis: Learning and recommendations report*. Paris: OECD Publishing; 2017. 88 p. URL: https://www.oecd.org/dac/conflict-fragility-resilience/docs/SwedenLearning_Recommendationsreport.pdf
22. Floris L.M., Calegario C.L., Ávila E., Caetano R.M. Determinant factors of insertion in global value chains: an analysis of the mining industry participation. *International Business*. 2020;15(3):80–102. <https://doi.org/10.18568/internext.v15i3.583>
23. Pietrobelli C., Marin A., Olivari J. Innovation in mining value chains: New evidence from Latin America. *Resources Policy*. 2018;58:1–10. URL: <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2018.05.010>
24. Kondratiev V.B. (ed.) *Resources-based modernization model: opportunities and constraints*. Moscow: IMEMO; 2020. 245 p. (In Russ.) URL: <https://www.imemo.ru/files/File/ru/publ/2020/2020-005.pdf>



25. Vdovin A.N. Value chains' specifics in the enterprises of the Russian fuel and power sector. *Upravleniye ekonomicheskimi sistemami*. 2011;(33):1–13. (In Russ.)
26. Nikitenko S., Goosen Ye. Added as an Instrument for the Development of the Kuzbass Coal Industry. *ECO*. (In Russ.) 2017;(9):104–124. URL: <https://ecotrends.ru/index.php/eco/article/view/1365>
27. Gereffi G., Humphrey J., Sturgeon T. The governance of global value chains. *Review of International Political Economy*. 2005;12(1):78–104. <https://doi.org/10.1080/09692290500049805>
28. Martin R. Regional economic resilience, hysteresis and recessionary shocks. *Journal of Economic Geography*. 2012;12(1):1–32. <https://doi.org/10.1093/jeg/lbr019>
29. Goosen E.V., Nikitenko S.M., Kagan E.S., Pakhomova E.O. Evolution of VAC in the context of coal industry advance in the conditions of digitization in Russia. *Eurasian Mining*. 2019;(2):36–40. <https://doi.org/10.17580/em.2019.02.08>
30. Felice G., Lamperti F., Piscitello L. The employment implications of additive manufacturing. *Industry and Innovation*. 2022;29(3):333–366. <https://doi.org/10.1080/13662716.2021.1967730>
31. Iizuka M., Pietrobelli C., Vargas F. Innovation in mining global value chains: implications for emerging economies. In: Daly A., Humphreys D., Raffo J., Valacchi G. (eds.) *Global Challenges for Innovation in Mining Industries*. Cambridge University Press; 2022. Pp. 88–116. <https://doi.org/10.1017/9781108904209.005>

Информация об авторах

Елена Владимировна Гоосен – кандидат экономических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук (ФИЦ УУХ СО РАН), г. Кемерово, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-1387-4802](https://orcid.org/0000-0002-1387-4802), Scopus ID [57192160485](https://scopus.com/authorid/57192160485), ResearcherID [E-1222-2014](https://orcid.org/E-1222-2014); e-mail egoosen@yandex.ru

Сергей Михайлович Никитенко – доктор экономических наук, доцент, главный научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук (ФИЦ УУХ СО РАН), г. Кемерово, Российская Федерация; ORCID [0000-0001-6684-4159](https://orcid.org/0000-0001-6684-4159), Scopus ID [56511552300](https://scopus.com/authorid/56511552300); e-mail nsm.nis@mail.ru

Владимир Иванович Клишин – доктор технических наук, член-корреспондент Российской академии наук, директор Института угля, Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук (ФИЦ УУХ СО РАН), г. Кемерово, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-8346-8068](https://orcid.org/0000-0002-8346-8068), Scopus ID [6701650965](https://scopus.com/authorid/6701650965); e-mail KlishinVI@ic.sbras.ru

Елена Сергеевна Каган – кандидат технических наук, доцент, заведующая кафедрой прикладной математики, Кемеровский государственный университет, г. Кемерово, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-8470-961X](https://orcid.org/0000-0002-8470-961X), Scopus ID [16039423400](https://scopus.com/authorid/16039423400), ResearcherID [N-5187-2015](https://orcid.org/N-5187-2015); e-mail kaganes@mail.ru

Юрий Фёдорович Патраков – доктор химических наук, профессор, заведующий лабораторией научных основ технологий обогащения угля Института угля, Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук (ФИЦ УУХ СО РАН), г. Кемерово, Российская Федерация; ORCID [0000-0001-8087-7563](https://orcid.org/0000-0001-8087-7563), Scopus ID [6603962456](https://scopus.com/authorid/6603962456); e-mail yupat52@gmail.com

Information about the authors

Elena V. Goosen – Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor, Leading Researcher, Federal Research Center of Coal and Coal-Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kemerovo, Russian Federation; ORCID [0000-0002-1387-4802](https://orcid.org/0000-0002-1387-4802), Scopus ID [57192160485](https://scopus.com/authorid/57192160485), ResearcherID [E-1222-2014](https://orcid.org/E-1222-2014); e-mail egoosen@yandex.ru

Sergey M. Nikitenko – Dr. Sci. (Econ.), Associate Professor, Leading Researcher, Federal Research Center of Coal and Coal-Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kemerovo, Russian Federation; ORCID [0000-0001-6684-4159](https://orcid.org/0000-0001-6684-4159), Scopus ID [56511552300](https://scopus.com/authorid/56511552300); e-mail nsm.nis@mail.ru

Vladimir I. Klishin – Dr. Sci. (Eng.), Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Director of the Institute of Coal, Federal Research Center of Coal and Coal-Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kemerovo, Russian Federation; ORCID [0000-0002-8346-8068](https://orcid.org/0000-0002-8346-8068), Scopus ID [6701650965](https://scopus.com/authorid/6701650965); e-mail KlishinVI@ic.sbras.ru

Elena S. Kagan – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Applied Mathematics, Kemerovo State University, Kemerovo, Russian Federation; ORCID [0000-0002-8470-961X](https://orcid.org/0000-0002-8470-961X), Scopus ID [16039423400](https://scopus.com/authorid/16039423400), ResearcherID [N-5187-2015](https://orcid.org/N-5187-2015); e-mail kaganes@mail.ru

Yury F. Patrakov – Dr. Sci. (Chem.), Professor, Head of the Laboratory of Scientific Fundamentals of Coal Enrichment Technologies, Institute of Coal, Federal Research Center of Coal and Coal-Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kemerovo, Russian Federation; ORCID [0000-0001-8087-7563](https://orcid.org/0000-0001-8087-7563), Scopus ID [6603962456](https://scopus.com/authorid/6603962456); e-mail yupat52@gmail.com

Поступила в редакцию 21.09.2022
Поступила после рецензирования 06.10.2022
Принята к публикации 07.10.2022

Received 21.09.2022
Revised 06.10.2022
Accepted 07.10.2022