ISSN 2307-2091 (print)
ISSN 2500-2414 (online)

Учредитель
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Уральский государственный горный университет»

ИЗВЕСТИЯ
Уральского государственного горного университета

Научно-технический журнал

NEWS
of the Ural State Mining University

Scientific and technical journal

Issue 3(55)

2019

Уральский государственный
горный университет

Известия Уральского государственного
горного университета
2019, вып. 3(55)

Ural State
Mining University

News of the Ural State
Mining University
2019, issue 3(55)

Журнал выходит 4 раза в год

Известия Уральского государственного горного университета – рецензируемый научно-технический журнал, в котором находят отражение актуальные вопросы изучения, оценки и промышленного освоения минерально-сырьевых ресурсов Уральского региона и сопредельных территорий. В их числе проблемы геологии и разведки недр, геофизических исследований, горного дела и горной механики, экономики природопользования.
К публикации принимаются статьи на русском и английском языках.
Полнотекстовая версия журнала размещается в свободном доступе на нашем сайте https://iuggu.ru, в системе журналов открытого доступа DOAJ и ROAD, а также на платформе Российского индекса научного цитирования (РИНЦ) НЭБ. Более полная информация и правила оформления статей размещены на сайте журнала.

Published 4 times a year

News of the Ural State Mining University is a peer-reviewed scientific and technical journal, which reflects topical issues of the study, evaluation and commercial development of mineral resources of the Ural region and adjacent territories. These include problems of geology and subsoil exploration, geophysical studies, mining and mining mechanics, environmental economics.
We accept for publication articles in Russian and English languages.
The full-text version of the journal is in the public domain on the website of the journal https://iuggu.ru, in DOAJ, ROAD and in the database of the Russian Science Citation Index of the Russian Universal Scientific Electronic Library.
Website of the journal contains a detailed information about the journal, as well as guidelines for authors.

Включен в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук», действующий с 1.12.2015 г.

Подписка на журнал осуществляется по каталогу Агентства «Роспечать»
«Газеты. Журналы», подписной индекс 25145.

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-75290 от 05.04.2019,
выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

Известия Уральского государственного горного университета. 2019, вып. 3(55)
News of the Ural State Mining University. 2019, issue 3(55)

Учредитель и издатель

УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Главный редактор

КОСАРЕВ Н. П. – д-р техн. наук, проф., Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия

Заместитель главного редактора

ГРЯЗНОВ О. Н. – д-р геол.-минерал. наук, проф., Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия

Ученый секретарь

ПОЛЕНОВ Ю. А. – д-р геол.-минерал. наук, проф., Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия

Редакционная коллегия

МАКАРОВ А. Б. – д-р геол.-минерал. наук, проф., Уральский государственный горный университет, *Екатеринбург, Россия* (Науки о Земле)
ДАВЫДОВ В. А. – канд. геол.-минерал. наук, ст. науч. сотр., Институт геофизики имени Ю. П. Булашевича УрО РАН, *Екатеринбург, Россия* (Науки о Земле)
ДАШКО Р. Э. – д-р геол.-минерал. наук, проф., Санкт-Петербургский горный университет, *Санкт-Петербург, Россия* (Науки о Земле)
ДУШИН В. А. – д-р геол.-минерал. наук, проф., Уральский государственный горный университет, *Екатеринбург, Россия* (Науки о Земле)
ЕРОХИН Ю. В. – канд. геол.-минерал. наук, Институт геологии и геохимии им. А. Н. Заварицкого УрО РАН, *Екатеринбург, Россия* (Науки о Земле)
ИВАНОВ К. С. – д-р геол.-минерал. наук, Институт геологии и геохимии им. А. Н. Заварицкого УрО РАН, *Екатеринбург, Россия* (Науки о Земле)
ИГОЛКИНА Г. В. – д-р геол.-минерал. наук, Институт геофизики им. Ю. П. Булашевича УрО РАН, *Екатеринбург, Россия* (Науки о Земле)
КОРОТЕЕВ В. А. – академик РАН, д-р геол.-минерал. наук, проф., Институт геологии и геохимии имени А. Н. Заварицкого УрО РАН, *Екатеринбург, Россия* (Науки о Земле)
МАЛИЧ К. Н. – канд. геол.-минерал. наук, Институт геологии и геохимии им. А. Н. Заварицкого УрО РАН, *Екатеринбург, Россия* (Науки о Земле)
НАУМОВ В. А. – д-р геол.-минерал. наук, доц., Пермский государственный национальный исследовательский университет, *Пермь, Россия* (Науки о Земле)
ПИСЕЦКИЙ В. Б. – д-р геол.-минерал. наук, проф., Уральский государственный горный университет, *Екатеринбург, Россия* (Науки о Земле)
ПУЧКОВ В. Н. – член-корр. РАН, д-р геол.-минерал. наук, Институт геологии Уфимского научного центра РАН, *Уфа, Россия* (Науки о Земле)
РИХВАНОВ Л. П. – д-р геол.-минерал. наук, проф., Национальный исследовательский Томский политехнический университет, *Томск, Россия* (Науки о Земле)
СУНГАТУЛЛИН Р. Х. – д-р геол.-минерал. наук, доц., Казанский (Приволжский) федеральный университет, *Казань, Россия* (Науки о Земле)
ХОМЕНКО В. П. – д-р геол.-минерал. наук, проф., Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, *Москва, Россия* (Науки о Земле)
ЩАПОВ В. А. – д-р геол.-минерал. наук, ст. науч. сотр., Институт геофизики им. Ю. П. Булашевича УрО РАН, *Екатеринбург, Россия* (Науки о Земле)
ЖАБКО А. В. – канд. техн. наук, доц., Уральский государственный горный университет, *Екатеринбург, Россия* (Технические науки; Науки о Земле)
ВАЛИЕВ Н. Г. – д-р техн. наук, проф., первый проректор, Уральский государственный горный университет, *Екатеринбург, Россия* (Технические науки; Науки о Земле)
ГОЛИК В. И. – д-р техн. наук, проф., Северо-Кавказский горно-металлургический институт, *Владикавказ, Россия* (Технические науки)
ГОРДЕЕВ В. А. – д-р техн. наук, проф., Уральский государственный горный университет, *Екатеринбург, Россия* (Технические науки)
ЗОТОВ А. Н. – д-р техн. наук, проф., Уфимский государственный нефтяной технический университет, *Уфа, Россия* (Технические науки)
ПОТАПОВ В. Я. – д-р техн. наук, доц., Уральский государственный горный университет, *Екатеринбург, Россия* (Технические науки)
ИГНАТЬЕВА М. Н. – д-р экон. наук, проф., Уральский государственный горный университет, *Екатеринбург, Россия* (Экономические науки)
ГЛАЗЫРИНА И. П. – д-р экон. наук, канд. физ.-мат. наук, Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, *Чита, Россия* (Экономические науки)
ДОРОШЕНКО Ю. А. – д-р экон. наук, проф., Белгородский государственный технологический университет имени В. Г. Шухова, *Белгород, Россия* (Экономические науки)
ДУШИН А. В. – д-р экон. наук, ректор, Уральский государственный горный университет, *Екатеринбург, Россия* (Экономические науки)
ЛАРИЧКИН Ф. Д. – д-р экон. наук, гл. науч. сотр., Институт экономических проблем им. Г. П. Лузина Кольского научного центра РАН, *Апатиты, Мурманская обл., Россия* (Экономические науки)
НАЗАРОВА З. М. – д-р экон. наук, проф., Российский государственный геологоразведочный университет имени С. Орджоникидзе, *Москва, Россия* (Экономические науки)

Члены международной редколлегии

АБДЕЛЬ ГАВАД А. Е. – Dr, Управление ядерных материалов, *Каир, Египет* (Науки о Земле)
МЕРКЛЕ Р. К. В. – Dr, Prof., Университет Претории, *Претория, Южная Африка* (Науки о Земле)
САДОВЕНКО И. А. – д-р техн. наук, проф., Национальный горный университет, *Днепр, Украина* (Науки о Земле; Технические науки)
БУЙ С. Н. – Dr.-Ing., ассоц. проф., проректор, Ханойский университет горного дела и геологии, *Ханой, Вьетнам* (Технические науки)
ВЕКСЛЕР Ю. А. – Dr.-Ing.habil, Prof., Marco Systemanalyse und Entwicklung GmbH, *Дахау, Германия* (Технические науки)
ДРЕБЕНШТЕДТ К. – Prof., Dr.-Ing., Фрайбергская горная академия, *Фрайберг, Германия* (Технические науки)
ИЛИАШ Н. – Dr of Technical Science, Prof., Петрошанский университет, *Петрошань, Румыния* (Технические науки)
МОРКУН В. С. – д-р техн. наук, профессор, проректор по научной работе, Криворожский национальный университет, *Кривой Рог, Украина* (Технические науки)
САКСЕНХОФЕР Р. Ф. – Univ.-Prof., Mag.rer.nat., Dr.mont., Горный университет Леобена, *Леобен, Австрия* (Технические науки)
ФЕРРЕРО А. М. – PhD, Туринский университет, *Турин, Италия* (Технические науки)
ВЕРШКОВ А. Ф. – д-р экон. наук, Департамент геологии АО «Волковгеология», *Алматы, Казахстан* (Науки о Земле; Экономические науки)
СЯО Ф. – PhD, Prof., Хэйлунцзянский университет науки и технологии, *Харбин, Китай* (Технические науки; Науки о Земле)
ТАМБОВЦЕВА Т. Т. – д-р экон. наук, ассоц. профессор, Рижский технический университет, *Рига, Латвия* (Экономические науки)
РАДА Е. К. – Dr, Prof., Университет Инсубрии, *Варесе, Италия* (Экономические науки)

Известия Уральского государственного горного университета. 2019, вып. 3(55)
News of the Ural State Mining University. 2019, issue 3(55)

Founder and publisher

URAL STATE MINING UNIVERSITY

Editor-in-Chief

N. P. KOSAREV, Dr, Prof. (*Ekaterinburg, Russia*, Ural State Mining University)

Deputy Editor-in-Chief

O. N. GRYAZNOV, Dr, Prof. (*Ekaterinburg, Russia*, Ural State Mining University)

Academic Secretary

Yu. A. POLENOV, Dr, Prof. (*Ekaterinburg, Russia*, Ural State Mining University)

Editorial board

A. B. MAKAROV, Dr, Prof., Ural State Mining University, *Ekaterinburg, Russia* (Earth sciences)
V. A. DAVYDOV, PhD, Institute of Geophysics, Ural Branch of Russian Academy of Sciences, *Ekaterinburg, Russia* (Earth sciences)
R. A. DASHKO, Dr, Prof., Saint-Peterburg Mining University, *Saint Petersburg, Russia* (Earth sciences)
V. A. DUSHIN, Dr, Prof., Ural State Mining University, *Ekaterinburg, Russia* (Earth sciences)
Yu. V. EROKHIN, PhD, Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch of Russian Academy of Sciences, *Ekaterinburg, Russia* (Earth sciences)
K. S. IVANOV, Dr, Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch of Russian Academy of Sciences, *Ekaterinburg, Russia* (Earth sciences)
G. V. IGOLKINA, Dr, Prof., *Ekaterinburg, Russia*, Institute of Geophysics, Ural Branch of Russian Academy of Sciences (Earth sciences)
V. A. KOROTEEV, Academician of the RAS, Dr, Professor, *Ekaterinburg, Russia*, Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch of Russian Academy of Sciences (Earth sciences)
K. N. MALITCH, PhD, Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch of Russian Academy of Sciences, *Ekaterinburg, Russia* (Earth sciences)
V. A. NAUMOV, Dr, Assoc. Prof., Perm State University, *Perm', Russia* (Earth sciences)
V. B. PISETSKI, Dr, Prof., Ural State Mining University, *Ekaterinburg, Russia* (Earth sciences)
V. N. PUCHKOV, Corresponding member of the RAS, Dr, Institute of Geology, Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences, *Ufa, Russia* (Earth sciences)
L. P. RIKHVANOV, Dr, Prof., Tomsk Polytechnic University, *Tomsk, Russia* (Earth sciences)
R. Kh. SUNGATULLIN, Dr, Assoc. Prof., Kazan Federal University, *Kazan', Russia* (Earth sciences)
V. P. KHOMENKO, Dr, Prof., Moscow State University of Civil Engineering, *Moscow, Russia* (Earth sciences)
V. A. SHCHAPOV, Dr, Prof., Institute of Geophysics, Ural Branch of Russian Academy of Sciences, *Ekaterinburg, Russia* (Earth sciences)
A. V. ZHABKO, PhD, Assoc. Prof., Ural State Mining University, *Ekaterinburg, Russia* (Engineering sciences; Earth sciences)
N. G. VALIEV, Dr, Prof., First Vice-Rector, Ural State Mining University, *Ekaterinburg, Russia* (Engineering sciences; Earth sciences)
V. I. GOLIK, Dr, Prof., North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy, State Technological University, *Vladikavkaz, Russia* (Engineering sciences)
V. A. GORDEEV, Dr, Prof., Ural State Mining University, *Ekaterinburg, Russia* (Engineering sciences)
V. Ya. POTAPOV, Dr, Prof., Ural State Mining University, *Ekaterinburg, Russia* (Engineering sciences)
A. N. ZOTOV, Dr, Prof., Ufa State Petroleum Technological University, *Ufa, Russia* (Engineering sciences)
M. N. IGNAT'EVA, Dr, Prof., Ural State Mining University, *Ekaterinburg, Russia* (Economic sciences)
I. P. GLAZYRINA, Dr, Prof., Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology of the Siberian Branch of the RAS, *Chita, Russia* (Economic sciences)
Yu. A. DOROSHENKO, Dr, Prof., Belgorod State Technological University named after B. G. Shukhov, *Belgorod, Russia* (Economic sciences)
A. V. DUSHIN, Dr, Rector, Ural State Mining University, *Ekaterinburg, Russia* (Economic sciences)
F. D. LARICHKIN, Dr, Luzin Institute for Economic Studies – Subdivision of the Federal Research Centre «Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences», *Apatity, Murmansk region, Russia* (Economic sciences)
Z. M. NAZAROVA, Dr, Prof., Russian State Geological Prospecting University named after Sergo Ordzhonikidze, *Moscow, Russia* (Economic sciences)

International members

A. E. ABDEL GAWAD, Dr, Nuclear Materials Authority, *Cairo, Egypt* (Earth sciences)
R. K. W. MERKLE, Dr, Prof., University of Pretoria, *Pretoria, South Africa* (Earth sciences)
I. A. SADOVENKO, Dr, Prof., National Mining University, *Dnepr, Ukraine* (Earth sciences; Engineering sciences)
X. N. BUI, Dr.-Ing., Assoc Prof., Vice Rector, Hanoi University of Mining and Geology, *Hanoi, Vietnam* (Engineering sciences)
Ju. A. VEKSLER, Dr.-Ing.habil, Prof., Marco Systemanalyse und Entwicklung GlbH, *Dachau, Germany* (Engineering sciences)
C. DREBENSTEDT, Prof., Dr.-Ing., Technical University Bergakademie, *Freiberg, Germany* (Engineering sciences)
N. ILIAS – Dr, Prof., Universitatea din Petrosani, *Petrosani, Romania* (Engineering sciences)
V. S. MORKUN, Dr, Prof., Vice-Rector for scientific work, Kryvyi Rih National University, *Krivoy Rog, Ukraine* (Engineering sciences)
R. F. SACHSENHOFER, Mag.rer.nat., Dr.mont., Univ.-Professor, University of Leoben, *Leoben, Austria* (Engineering sciences)
A.-M. FERRERO, PhD, University of Turin, *Turin, Italy* (Engineering sciences)
A. F. VERSHKOV, Dr, Prof., Geology Department in Uranium Exploration Company «Volkovgeologiia», *Almaty, Kazakhstan* (Earth sciences; Economic sciences)
F. XIAO, PhD, Prof., Heilongjiang University of Science and Technology, *Harbin, China* (Engineering sciences; Earth sciences)
T. T. TAMBOVCEVA, Dr, Assoc Prof., Riga Technical University, *Riga, Latvia* (Economic sciences)
E. C. RADA, Dr, Prof., Insubria University, *Varese, Italy* (Economic sciences)

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

Трехмерное глубинное структурное моделирование центральной восточной части Суэцкого залива, Египет
А. Таршан, С. В. Шиманский, М. М. Абдин
(In English)

Палеовулканическая модель эволюции фундаментального комплекса центральной части Восточной пустыни Египта
А. С. Махмуд, В. В. Дьяконов
(In English)

Палеогеоморфологические предпосылки осадконакопления девонских отложений Прикаспийской впадины
Н. Ф. Федорова
(In English)

Полихромные турмалины из редкометальных гранитных пегматитов Медведевского редкометального месторождения (Средний Урал)
Р. А. Обоскалов, М. П. Попов
(In English)

Физико-химическая характеристика горючих сланцев месторождений Джангичай, Большой и Малый Сияки (Республика Азербайджан)
К. Ю. Аджамов, С. Р. Расулов, Э. А. Гусейнова, С. М. Гасанова

Рудные ниобиевые минералы группы пирохлора карбонатитовых комплексов Урала: особенности состава и геохимическая эволюция
И. Л. Недосекова, С. В. Прибавкин

Техногенные месторождения: особенности исследований
А. Б. Макаров, Г. Г. Хасанова, А. Г. Талалай

Предпосылки успешного применения простых методов электрометрии при поисках глубокозалегающих колчеданных месторождений
В. М. Сапожников

Геохимия донных отложений рек Красноуральского промузла
М. В. Шабанов

Метод связи каналов в теории экзогенных геофизических систем
В. Б. Сурнев, В. Б. Пяткова, Д. В. Исламгалиев

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Изучение генезиса продуктивных рядов по данным интегрированных скважин (на месторождении Пираллахи)
К. Керимова, Р. Ганиева
(In English)

EARTH SCIENCES

7 **Three-dimensional depth-based structural modelling of the central eastern part of the Gulf of Suez, Egypt**
A. Tarshan, M. M. Abdeen, S.V. Shimanskiy
(In English)

20 **Paleovolcanic model for the evolution of the basement complex of the central part of Egyptian Eastern Desert**
A. S. Mahmoud, V. V. Dyakonov
(In English)

27 **Paleogeomorphic depositional settings of the devon sediments of the pre-Caspian depression**
N. F. Fedorova
(In English)

33 **Polychromic tourmalines from rare-metal granite pegmatites of the Medvedevsky rare metal deposit (Middle Urals)**
P. A. Oboskalov, M. P. Popov
(In English)

39 **Physico-chemical characteristics of oil shale deposits Dzhangichay, Bolshoy Siyaki and Maliy Siyaki (Republic of Azerbaijan)**
K. Y. Adzhamov, S. R. Rasulov, E. A. Guseinova, S. M. Gasanova

46 **Ore niobium minerals of the pyrochlore group of carbonates of the Urals: compositional features and geochemical evolution**
I. L. Nedosekova, S. V. Pribavkin

58 **Technogenic deposits: research features**
F. B. Makarov, G. G. Khasanova, A. G. Talalay

63 **Conditions for successful application of simple electrometry methods in searching for deep-seated pyrite deposits**
V. M. Sapozhnikov

72 **Geochemistry of rivers bed deposits of the Krasnouralsk industrial hub**
M. V. Shabanov

79 **Channel communication method in exogenous theory geophysical systems**
V. B. Sournev, V. B. Pyatkova, D. V. Islamgaliev

ENGINEERING SCIENCES

90 **Study of genesis of productive series based on integrated well data (in case of Pirallahi field)**
K. Kerimova, R. Ganiyeva
(In English)

Результаты теоретических и лабораторных исследований спасательного комплекса для угольных шахт 98 **Determination of the rational parameters of screw loaders of the Ural-20R heading-and-winning machines**
Р. Ю. Уразбахтин, Д. А. Юнгмейстер — R. Y. Urazbakhtin, D. A. Yungmeister

Определение напряженно-деформированного состояния силового гидроцилиндра в режиме динамического нагружения 104 **Determination of the strain-stress state of a power hydraulic cylinder in nonstationary loading mode**
Д. А. Потахов — D. A. Potakhov

Континуальная концепция сдвиговой дезинтеграции твердых тел 111 **Continuum theory of shear disintegration of solid bodies**
А. В. Жабко — A. V. Zhabko

Критерии подобия гидровихревой локализации взрывов на горных предприятиях 124 **Similarity parameters for hydro-vortex blast isolation in mining enterprises**
Н. П. Косарев, В. Н. Макаров, А. В. Угольников, А. Ю. Матеров, Н. В. Макаров, А. В. Лифанов — N. P. Kosarev, V. N. Makarov, A. V. Ugol'nikov, A. Y. Materov, N. V. Makarov, A. V. Lifanov

Моделирование взаимодействия ленты с перекошенным барабаном конвейера 133 **Modelling the interaction of the belt with the out-of-line pulley of the conveyor**
А. А. Реутов — A. A. Reutov

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ — ECONOMIC SCIENCES

Методический подход к определению эколого-экономической эффективности переработки техногенных образований 141 **The methodological approach to determining the environmental and economic efficiency of processing of man-made mineral formations**
О. А. Романова, Д. В. Сиротин **(In English)** — O. A. Romanova, D. V. Sirotin **(In English)**

Предприятия-недропользователи в роли загрязнителей и защитников природной среды 150 **Subsoil users as pollutants and environmentalists**
В. Н. Логинов, М. Н. Игнатьева, В. В. Балашенко — V. N. Loginov, M. N. Ignat'eva, V. V. Balashenko

Методологические положения формирования и оценки экономического ущерба 157 **Methodological provisions of the formation and evaluation economic disbenefit**
А. И. Иванов — A. I. Ivanov

Исследование эколого-ориентированной подземной геотехнологии добычи и переработки железных руд на основе экономико-математического моделирования 162 **Environmental-friendly underground research geotechnologies of mining and processing of iron ore based on economic and mathematical modelling**
И. В. Соколов, Н. В. Гобов, Ю. М. Соломеин — I. V. Sokolov, N. V. Gobov, Y. M. Solomein

Выбор направлений социально-экономического развития моногородов горной специализации 171 **The choice of socio-economic development areas for one-factory towns**
И. В. Дроздова — I. V. Drozdova

ИСТОРИЯ ГОРНОГО ДЕЛА — HISTORY OF MINING

Дмитрий Сергеевич Штейнберг (1910–1992) и дмиштейнбергит 178 **Dmitry Sergeevich Shteinberg (1910–1992) and dmishteinbergite**
А. Г. Шорин, Ю. В. Ерохин — A. G. Shorin, Y. V. Erokhin

Памятник Анри Барбюсу (история создания) 187 **Monument to Henri Barbusse (creation story)**
В. В. Филатов — V. V. Filatov

Науки о Земле
Earth sciences

УДК 550.8+550.34+ 553.98 https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-3-7-19

Three-dimensional depth-based structural modelling of the central eastern part of the Gulf of Suez, Egypt

Ahmed TARSHAN[1, 2*]
Sergey Vladimirovich SHIMANSKIY[1**]
Mamdouh M. ABDEEN[3***]

[1]Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia
[2]Nuclear Materials Authority, Cairo, Egypt
[3]National Authority for Remote Sensing and Space Sciences, Cairo, Egypt

Building a three dimensional (3D) geological model of field and subsurface data is an important task in geological and geophysical studies.
The goal of this research is to build 3D structural model of the central eastern part of the Gulf of Suez, Egypt. Available seismic sections and well data were collected for use in building the model. Each horizon, on each seismic section, was digitised accurately using Petrel software for generating a depth-structure map for each horizon. The basement layer was constructed using airborne magnetic data of the area under study. The GM–SYS–3D inversion code was used to presume the sedimentary section-basement complex magnetic susceptibility. Estimates of the depth to the basement varied reliably between 500 and 4700 m. Data from 24 drilled wells within the area was used to define the thickness and orientation of the layers between the horizons of the 3D grid model. A model consisting of 29 layers, including the topography and basement layers, was created using Petrel software.
Results of the 3D model show that the study area has a multi-reservoir character, with several productive pre-rift and synrift reservoirs. It contains seven reservoirs overlain by sealing rocks and underlain by source rocks. The presence of hydrocarbons in these reservoirs has been demonstrated in some fields in the area. Five new locations are also recommended for detailed 2D and 3D seismic survey, as hydrocarbon may be present in these locations.

Keywords: 3D modelling, depth-structure maps, horizons and layering, Gulf of Suez, Egypt.

Introduction

The Gulf of Suez (GOS) is the northwestern arm of the Red Sea rift system and partly separates the Sinai Peninsula from the remainder of Egypt (Fig. 1). It is a Cenozoic rift about 300 km long and up to 80 km wide. Uplift of both flanks of the rift exposed a relatively complete stratigraphic section ranging in age from the Precambrian to the Quaternary (Fig. 2). Exposures are excellent, with arid climate and active erosion allowing a detailed and clear examination of the sedimentological, stratigraphical and structural relationships [1–3].

The pre-rift sedimentary sequence is composed of strata ranging in age from Cambrian to Late Eocene and contains sand, shale, and carbonate facies that were laid down over the Precambrian granitic basement under terrestrial and marine platform environments. This period of sedimentation was affected by major unconformities representing non deposition or erosion at different geologic times [5]. The Phanerozoic stratigraphic sequence is composed of the Nubia Group (Nubia D, Nubia C, Nubia B, and Nubia A formations), Raha, Abu Qada, Wata, Matulla, Dawi (Brown limestone), Sudr, Esna, and Thebes formations (Fig. 3).

The syn-rift stratigraphic sequence in the GOS is composed of Miocene strata ranging in age from (29.3–13 Ma). It is represented by Nukhul, Rudeis and Kareem formations (Fig. 3).

The post-rift stratigraphic sequence in the GOS is represented by strata ranging in age from (14.2–0 Ma) [6]. This sequence is represented by Belayim, South Gharib, and Zeit formations (Fig. 3).

The GOS is the most prolific and prospective oil province in Egypt, and any open acreage, or relinquished areas, will be of great interest to the oil industry. The majority of oil fields in the GOS incorporate multiple productive reservoirs. These reservoirs can be classified as (1) pre-rift reservoirs, such as the Precambrian fractured granitic rocks, Palaeozoic–Lower Cretaceous Nubian sandstones, Upper Cretaceous Nezzazat sandstones and the Eocene fractured Thebes limestone; (2) synrift reservoirs, such as the Miocene sandstones and carbonates of the Nukhul, Rudeis, Kareem, and Belayim formations and the sandstones of South Gharib, Zeit, and post-Zeit formations. Miocene evaporites are the ultimate hydrocarbon seals, and the shale and dense limestones of the pre-rift and the synrift stratigraphic units are the primary seals [5]. Structural, stratigraphical, and combination traps are encountered in the study area.

A large number of reservoir models can be created relatively quickly with geostatistical tools, such as Petrel modelling software; one of the most popular modelling software in oil industry, but often a limited number of inputs must be selected to the flow simulation due to computational time requirements [7]. 3D modelling is the process of developing a mathematical representation of any 3D surface of object (either inanimate or living) via specialised software. The product is called a 3D model [8, 9]. In general, the model is a representation of something, or an event in the real world. The model is good if it adequately describes a property or some real world properties relevant to the study. For example, a 3D geological model of an area is good if it returns the values of the real world in reservoir simulations and reservoir modelling.

* ✉ahmed_ramadan_geo@hotmail.com
https://orcid.org/0000-0001-9710-9392
**s.shimanskii@spbu.ru
https://orcid.org/0000-0002-5403-5220
***mamdouh.abdeen@narss.sci.eg
https://orcid.org/0000-0001-8863-1322

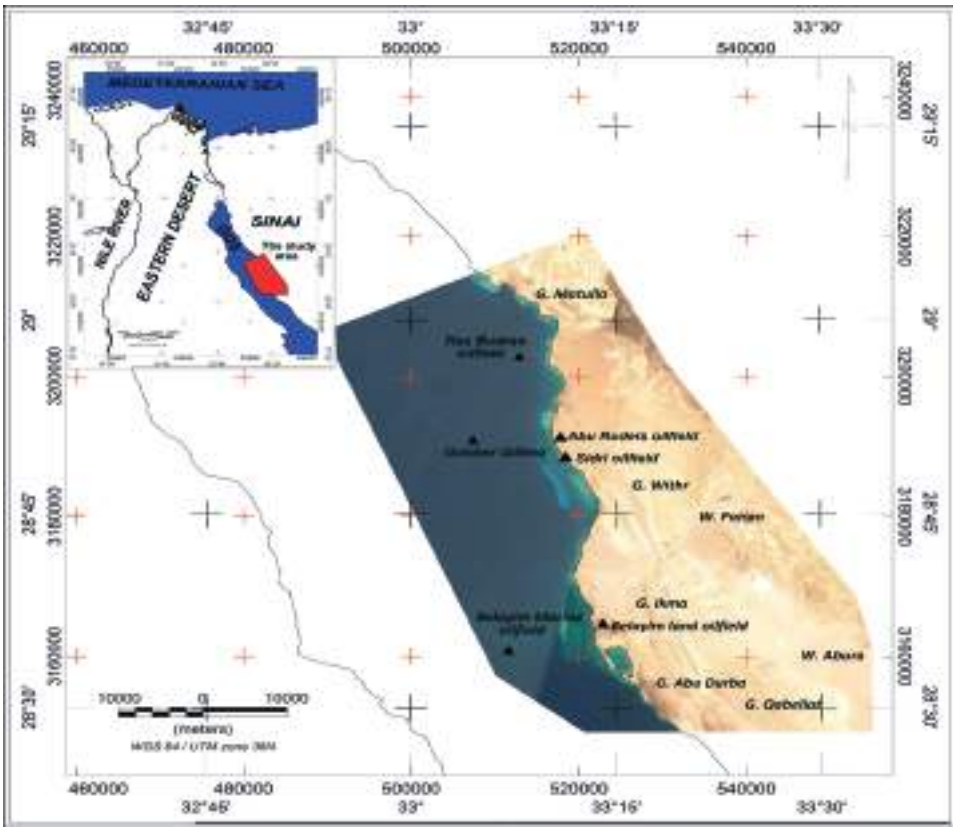


Figure 1. Location map and satellite image of the study area, with the location of main features and oil fields.
Рисунок 1. Карта расположения и спутниковое изображение области исследования, с расположением основных особенностей и нефтяных месторождений.

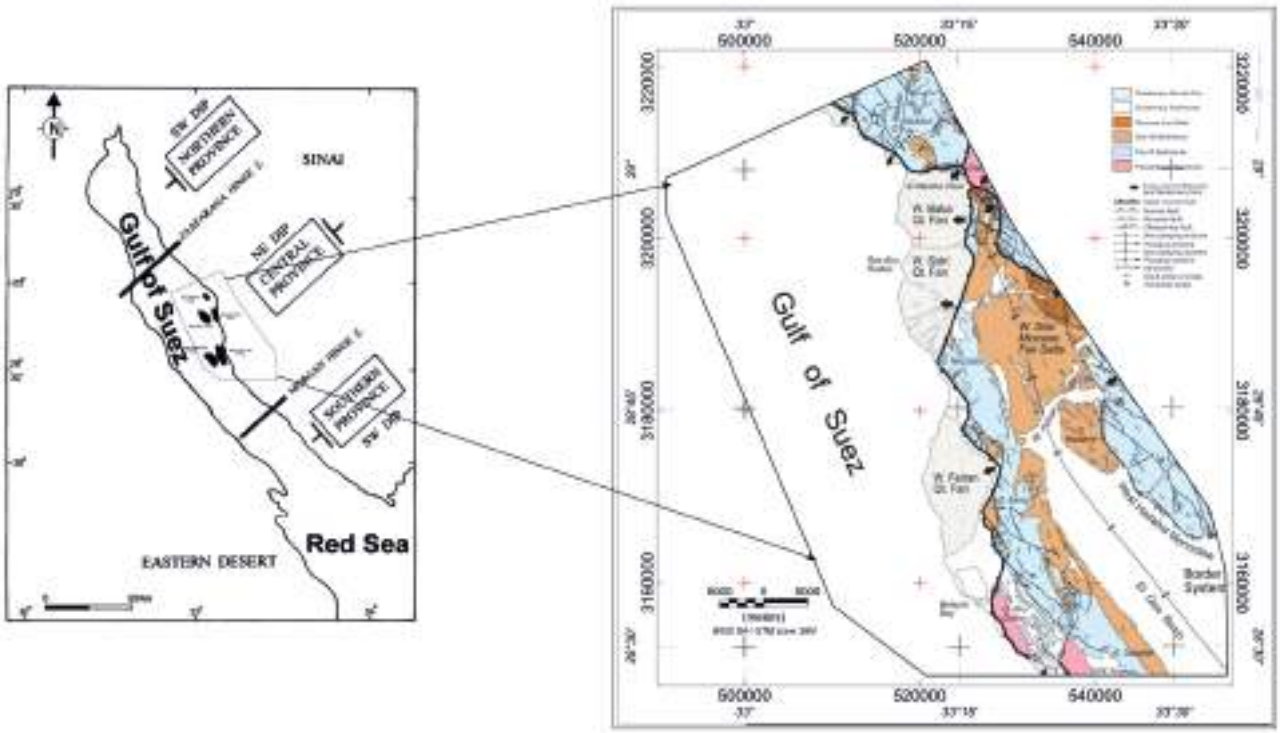


Figure 2. Geological map of the central eastern part of the Gulf of Suez, Egypt [4]. The onset map shows the Gulf of Suez, the three dip provinces and the hinge (accommodation) zones between them and the location of main oil fields.
Рисунок 2. Геологическая карта центрально-восточной части Суэцкого залива, Египет [4]. На карте изображен Суэцкий залив, три провинции с наклонением и зоны пластичности между ними, а также показано расположение основных нефтяных месторождений.

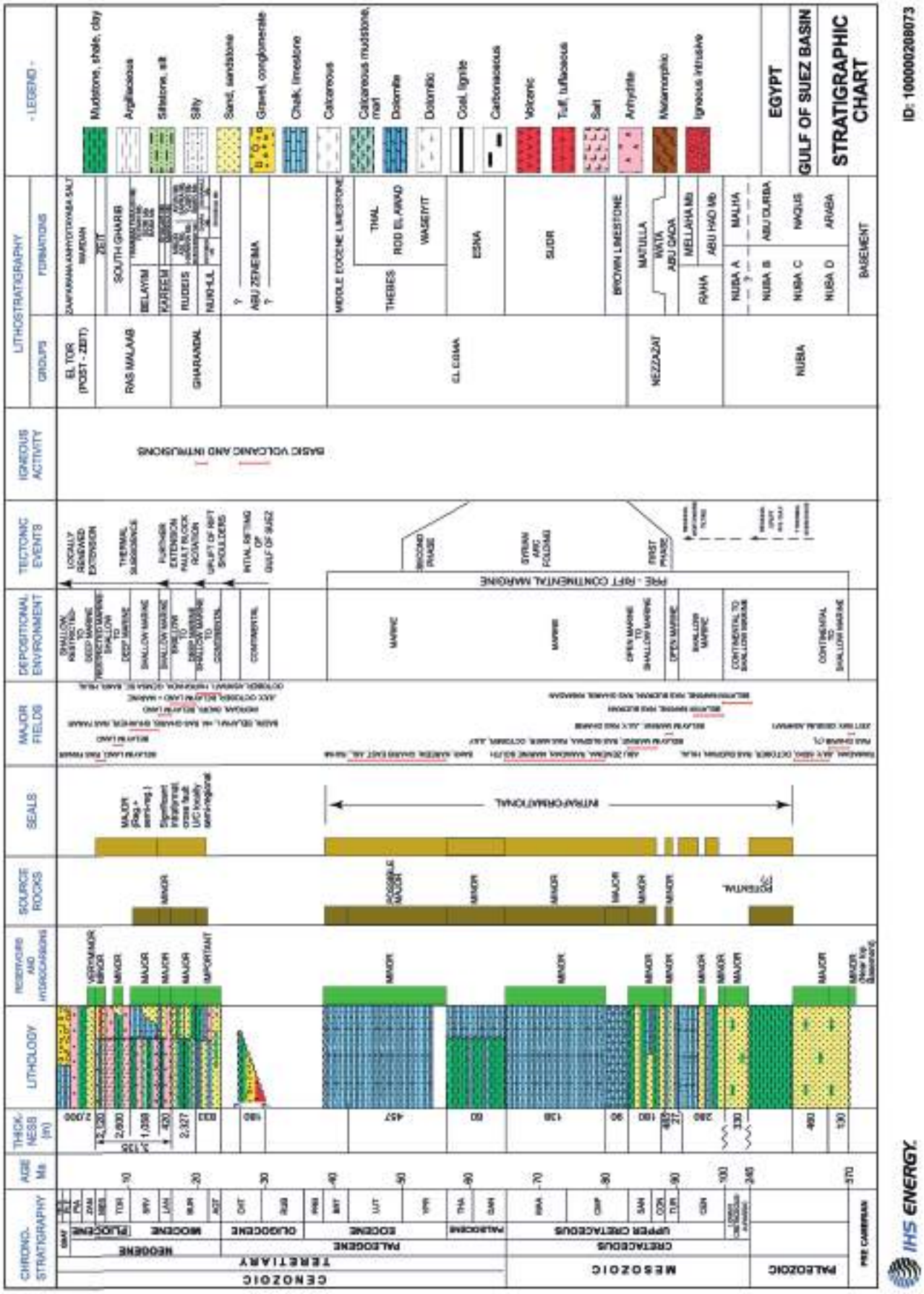


Figure 3. Litho-stratigraphic column of Gulf of Suez [6].
Рисунок 3. Литостратиграфический разрез Суэцкого залива [6].

In this research, a 3D model of the central eastern part of the GOS rift (Fig. 1) was built using seismic and well data as well as airborne magnetic data and surface digital elevation model (DEM).

The study area covers 2745 km^2 and lies between latitudes 28°28′07.22″and 29°06′46.05″ North and longitudes 32°54′27.39″and 33°33′44.13″ East. Data was collected and digitised using Petrel software to be used in building the model. 3D modelling of the airborne magnetic data was performed to delineate the basement relief. Structure depths maps were created using seismic and well data. The study area includes five well known oil fields (Fig. 1); from north to south, are Ras Budran, Abu Rudeis, October, Feiran and Belayim.

1. 3D magnetic modelling

In March 1998, the Airborne Geophysics Department of the Nuclear Materials Authority (NMA) of Egypt led a high-resolution aeromagnetic survey covering 2745 km^2 over the central eastern part of the GOS. Data was gained along primary (essential) lines spaced at 1000 m, and along control lines spaced at 10000 m, (normal to the primary lines). The nominal flying elevation was about 100 m (330 ft) above the ground surface (terrain clearance). The direction of the survey was 125°–305° azimuth degrees for the primary lines and 35°–215° azimuth degrees for the control lines.

Using the GM–SYS–3D inversion code, the presumed sedimentary section-basement complex magnetic susceptibility contrast Δk for several inversion trials was gradually set between 0.035 and 0.08 SI during the inversion run. The inverted basement relief images, corresponding to the used susceptibility contrasts, were consistently inspected. The effective susceptibility contrast was found to be close to the susceptibility contrast of 0.0628 SI (5000 micro cgs unit), and accordingly, its calculated basement relief image was established (Fig. 4). The overall calculated 3D response fits the observed geomagnetic data (better than ±50.0 nT). Other model parameters are set to be constant for all trails (convergence limit: 10 nT, Z0: 0m and regional offset: 0.0), where Z0 is the nominal top of the basement surface. Estimates of the depth to the basement varied between 500 and 4700 m. The basement relief encountered at the study area has shown three major basinal structures (Fig. 4). These basins are located at the northwestern, west central and southeastern parts of the study area [10].

2. Creating depth-based structural model

The available interpreted seismic sections and well data in the area under study were collected from different published sources [11–13]. Sixteen seismic sections were obtained covering the northern, central and southern parts of the study area in addition to a single geologic cross section for the southeastern part of the area (Fig. 5). Seismic lines GS-370, in-line 195, in-line 215, in-line 215, cross-line 360, cross-line 280 and cross-line 330 are published by [12]. Seismic lines RG-12-82, RG-14-82, RS-27-83, R6-05-82, and R6-07-83 are published by [13]. Seismic lines 1330, 1150, 1570 and ARB are published by [11]. The geologic cross section for the southeastern part of the study area is obtained from [14]. These data were gathered and used in producing a depth-structure map for each formation in the area under study using Petrel software. The locations of these lines were traced accurately from the location map of the area (Fig. 5); the longitude and latitude were defined for each line and were used in locating the seismic lines in their exact locations in the 3D view (Fig. 6) [15].

2.1. Data digitising

Each horizon on each seismic section was digitised accurately using Petrel software to be used in creating a depth-structure map for the top of each horizon, as shown in Fig. 7, a–f. These figures show the intersection between the depth-structure maps

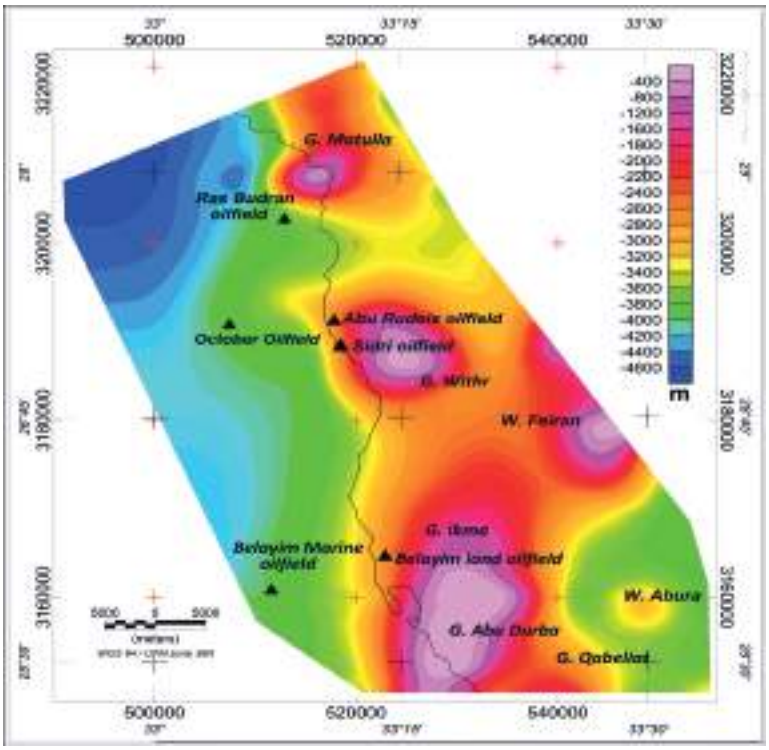


Figure 4. Basement relief contour map of the study area using aero-magnetic data after performing the 3D layered-earth inversion of the subsurface magnetic susceptibility distributions [10].

Рисунок 4. Контурная карта рельефа фундамента исследуемой территории с использованием аэромагнитных данных после проведения трехмерной инверсии слоистой среды приповерхностных распределениях магнитной восприимчивости [10].

of the top of each formation and the seismic sections. For example, Fig. 7, a illustrates the intersection between the produced depth-structure map of the top South Gharib Formation with seismic line RG-12-82. These figures indicate that there is an adequate matching between the digitised seismic sections and the depth-structure maps.

2.2. Well data

Depth to each formation was gathered from different wells in the area under study from different published sources [15–24] as shown in Table. The locations of the all wells are illustrated in Fig. 5. These data were plotted on the 3D view using Petrel software (Fig. 6).

2.3. Depth-structure maps

One of the most important tools for 3D structural interpretation is the structure contour map. This is because it is seen as a fully 3D form of the map horizon. The well data and the digitised horizons were used together to create depth-structure maps for the main horizons using Petrel software. Nine depth-structure maps were generated for Zeit, South Gharib, Belayim, Kareem, Rudeis, Nukhul, Thebes, Matulla and Nubia formations (Fig. 8, 9, 10, a). The topographic map (Fig. 10, b) of the study area was produced using Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) data and Geosoft Oasis Montaj. The data is uploaded in the three dimensional view using Petrel software (Fig. 12).

2.4. Pillar Gridding

It is the process of creating the grid that is the basis of all 3D modelling. The skeleton of the model consists of upper, middle and base skeleton grids. The produced pillar gridding using Petrel software is shown in Fig. 11.

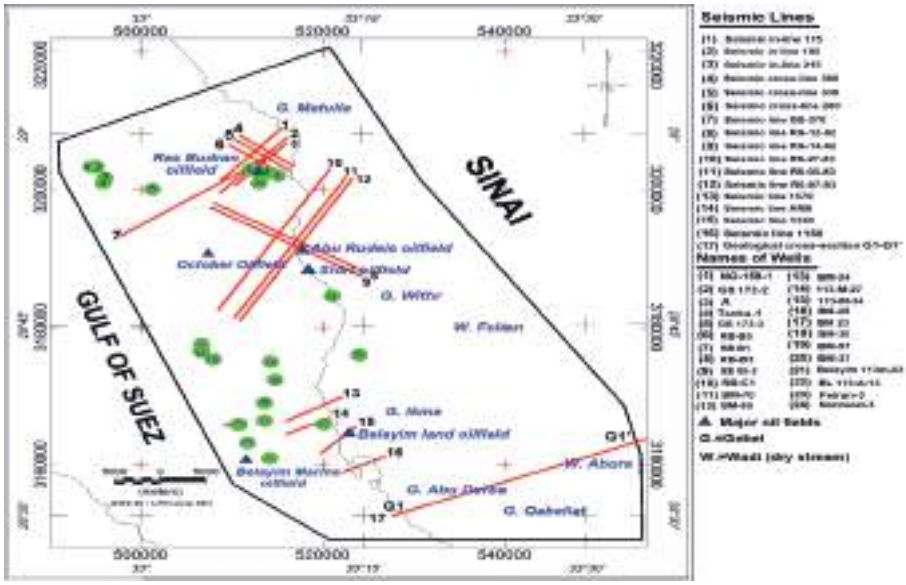


Figure 5. Location map of wells and seismic sections used in the model building, eastern part of Gulf of Suez [15].
Рисунок 5. Карта расположения скважин и сейсмических разрезов, использованных в модельном построении восточной части Суэцкого залива [15].

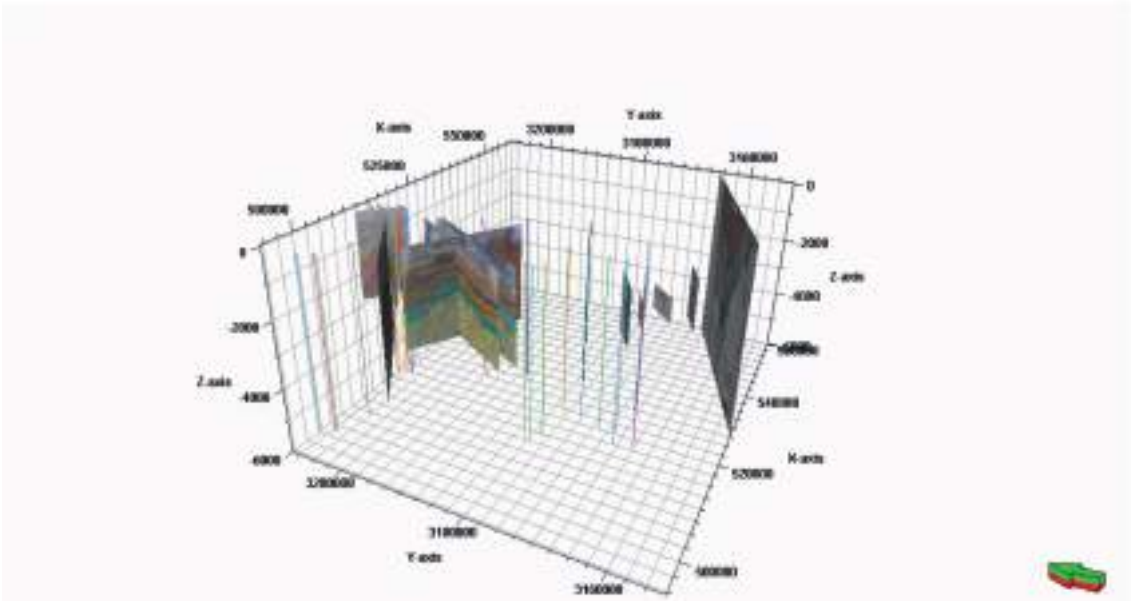


Figure 6. Three dimensional view using Petrel software illustrating the location of the wells and the seismic lines used in the model construction.
Рисунок 6. Трехмерное изображение с использованием программного обеспечения Petrel, иллюстрирующее местоположение скважин и сейсмических линий, используемых при построении модели.

Table 1. Depth in meters to top of each layer in wells (A, NO-159-1, GS 172-2, GS 173-3, RB-B5, RB-B1, RB-B3, EE 85-2, RB-C1, Tanka-1, BM-30, BM-37, Belayim 113m-63, Feiran-3, Nazzazat-3, BM-70, BM-65, BM-24, 113-M-27, 113-M-34, BM-29, BM 23, BM-57, BL 113-A-15) in the central eastern part of the Gulf of Suez, Egypt.

Таблица 1. Глубина в метрах до кровли каждого пласта в скважинах (A, NO-159-1, GS 172-2, GS 173-3, RB-B5, RB-B1, RB-B3, EE 85-2, RB-C1, Tanka-1, BM-30, BM-37, Belayim 113m-63, Feiran-3, Nazzazat-3, BM-70, BM-65, BM-24, 113-M-27, 113-M-34, BM-29, BM 23, BM-57, BL 113-A-15) в центральной восточной части Суэцкого залива, Египет.

Layer Name		Well Name																							
		A	NO-159-1	GS 172-2	GS 173-3	RB-B5	RB-B1	RB-B3	EE 85-2	RB-C1	Tanka-1	BM-30	BM-37	Bela-yim 113m-63	Fei-ran-3	Nazza-zat-3	BM-65	BM-24	113-M-27	113-M-34	BM 23	BM-57	BL 113-A-15	BM-29	BM-70
Zeit FM.		–	975.3	853.44	–	949.14	938.78	935.12	847.34	900.98	–	–	–	–	–	489.2	840	809	1146	1104	1033	835	–	–	1067
South Gharib FM.		–	1950.7	1981.2	–	1359.7	1333.2	1327.7	1362.15	1269.5	–	–	–	–	1148.79	–	1626	1446	1896	1844	1711	1500	–	–	1899
Belayim FM	Hammam Faroun Mbr. (Including three beds forming trap)	–	2179.3	2255.52	1645.92	1623.4	1583.7	1570.3	1605.07	1551.1	–	–	–	–	–	–	2164	1978	2410	2404	2197	2002	–	–	2362
	Feiran Mbr.	–	–	–	–	1663	1613.6	1606.9	1639.51	1565.1	–	–	–	–	–	–	–	2011	2459	2466	–	–	–	–	–
	Sidri Mbr.	–	–	–	–	1805.9	1738	1733.4	1766.01	1741.6	–	–	–	–	–	–	–	2078	2576	2567	–	–	–	–	–
	Baba Mbr.	–	–	–	–	1838.9	1769.7	1764.5	1791.61	1775.5	–	–	–	–	–		–	2097	2603	2592	–	–	–	–	–
Kareem-Shale Mbr.		2650	2438.4	2560.3	2133.6	1885.8	1820.3	1814.8	1842.51	1830	–	–	–	–	–	–	2667	2183	2710	2698	2503	2247	–	–	2592
Kareem-Ma Mbr.		–	–	–	–	2014.1	1912.9	1910.2	1952.49	1953.5	–	–	–	–	–	–	–	2373	2929	2919	–	–	–	–	–
Upper Rudeis Mbr.		–	2621.2	2834.6	2712.7	2108.6	1998.6	1987.9	2058.61	2032.7	–	2865	2800	–	–	–	2811	2410	2919	2919	2686	2424	–	2592	2792
Lower Rudeis Mbr.		–	–	–	–	2605.4	2517	2377.7	2747.46	2606.3	–	–	–	–	–	–	–	2590	3331	3175	–	–	–	–	–
Nukhul FM.		–	3505.2	–	3322.2	3091.9	2517	2457.9	2747.46	3014.2	3728.61	–	–	–	–	–	3030	2590	3331	3175	2859	2565	–	–	3263
Thebes FM.		–	–	–	2922	3091.9	2517	2468.6	2777.33	3179.7	–	3000	–	2760	–	–	3030	2590	3331	3175	2922	2590	3051	–	3263
Esna FM.		–	–	–	–	3091.9	2850.2	2872.1	3140.04	3298.2	–	–	–	–	–	–	–	2590	3568	3219	–	–	–	–	–
Sudr FM.		–	–	–	–	3091.9	2894.1	2909.3	3183.33	3311	–	–	–	–	–	–	–	2590	3572	3244	–	–	–	–	–
Dawi FM.		–	–	–	–	3091.9	2993.1	2950.5	3250.38	3311	–	–	–	–	–	–	–	2590	3572	3307	–	–	–	–	–
Matulla FM.		–	–	–	–	3091.9	3019	2988.3	3317.44	3311	–	–	–	3000	–	–	3124	2590	3587	3353	3085	2772	3397	–	3387
Wata-Qada FMs.		–	–	–	–	3196.7	3052.3	3105	3401.56	3311	–	–	–	–	–	–	–	2682	3715	3472	–	–	–	–	–
Raha FM.		–	–	–	–	3292.8	3191.3	3264.7	3446.98	3349.8	–	–	–	–	–	–	–	2775	3803	3559	–	–	–	–	–
Nubia FM	Nubia A–P1 Mbr.	–	–	–	3808.78	3417.4	3337	3272	3560.36	3517.7	–	–		3140	–	–	3124	2834	3907	3657	–	2933	–	–	3615
	Nubia A–S1 Mbr.	–	–	–	–	3426.3	3407.4	3393.3	3626.2	3543.3	–	–	–	–	–	–	–	2875	3933	3701	–	–	–	–	–
	Nubia A–P2 Mbr.	–	–	–	–	3442.4	3428.7	3528.1	3639.92	3566.8	–	–	–	–	–	–	–	2916	3978	3820	–	–	–	–	–
	Nubia A–S2 Mbr.	–	–	–	–	3514,95	3497.9	3565.6	3656.99	3603	–	–	–	–	–	–	–	2923	4002	3842	–	–	–	–	–
	Nubia A-P3 Mbr.	–	–	–	–	3604.6	3552.4	3595.4	3759.7	3615.5	–	–	–	–	–	–	–	2983	4002	3842	–	–	–	–	–
	Nubia A-S3 Mbr.	–	–	–	–	3604.6	3552.4	3595.4	3822.8	3615.5	–	–	–	–	–	–	–	3005	4002	3842	–	–	–	–	–
	Nubia B FM.	–	–	–	–	3604.6	3552.4	3595.4	3822.8	3615.5	–	–	–	–	–	–	–	3005	4002	3842	–	–	–	–	–
	Nubia C-D FM.	–	–	–	–	3604.6	3685.9	3595.4	3822.8	3750	–	–	–	–	–	–	–	3094	4121	4007	–	–	–	–	–
Basement		–	–	–	–	3746.6	3868.8	3785	4126.68	3852.7	–	–	–	–	–	–	–	3177	4181	4160	–	–	–	–	–
Reference		[16]	[17]		[18]	[19]					[20]						[21]	[22]			[23]		[24]		

2.5. Defining Horizons and Layering

The most important step in structural modelling is inserting the horizons into the pillar grid. The horizon process step was used to define the vertical layering in the 3D grid in Petrel software. The final step in building the structural framework is defining the thickness and orientation of the layers between the horizons of the 3D grid. Data was collected for 24 wells within the study area. The stratigraphic succession was defined from this data. This data shows that the study area consists of more than eleven layers as interpreted in the seismic sections. The seismic sections and the wells data were used to define the thickness and orientation of layers between horizons of the 3D grid.

Some formations are divided into members, for example, the Belayim Formation is divided into four members: Hammam Faroun, Feiran, Sidri and Baba. The Hammam Faroun Member includes three types of lithology: shale in the upper part of the member, sandstone in the middle and shale in the lower part, these lithologies form the trap in Belayim Formation. The Kareem Formation is divided into two members, Shale member that is composed of shale in the upper part of the formation and Ma member that is composed of anhydrites in the lower part of the formation. The Rudeis Formation is divided into Upper Rudeis and Lower Rudeis members. Four layers were generated between the horizons of the Thebes and Matulla, as follows: the Thebes, Esna, Sudr, and Dawi formations. Three layers were generated between the horizons of the Matulla Formation (Lower Senonian) and Nubia Formation. These layers are, the Matulla, Wata-Qada and Raha formations. Finally, the Nubia Formation is divided into seven layers, the Nubia A-P1, Nubia A-S1, Nubia A-P2, Nubia A-S2, Nubia A-P3, Nubia A-S3, and Nubia C-D.

The depth to the top of each formation is illustrated for all wells (Table), these depths data were used to manage the process of the layering, and the locations of these wells are illustrated in Fig. 5. Finally, a 3D depth model was created (Fig. 12).

Results and Discussion

The 3D model (Fig. 12) illustrates that the study area contains promising locations for hydrocarbon exploration; these locations are characterised by a good succession of sedimentary rocks overlying the basement layer. These rocks include the three types of rocks, source, reservoir and sealing rocks, to form traps. The petroleum system event chart (Fig. 13) of the area illustrates the source, reservoir and seal rocks with geological time, which indicate a possibility of traps forming in the area under study. However, the area includes five oil fields: Ras Budran field in the north central part, Abu Rudeis field to the south of Ras Budran field, Feiran field in the central part and the Belayim field in the southwestern part of the area. The probability of hydrocarbon po-

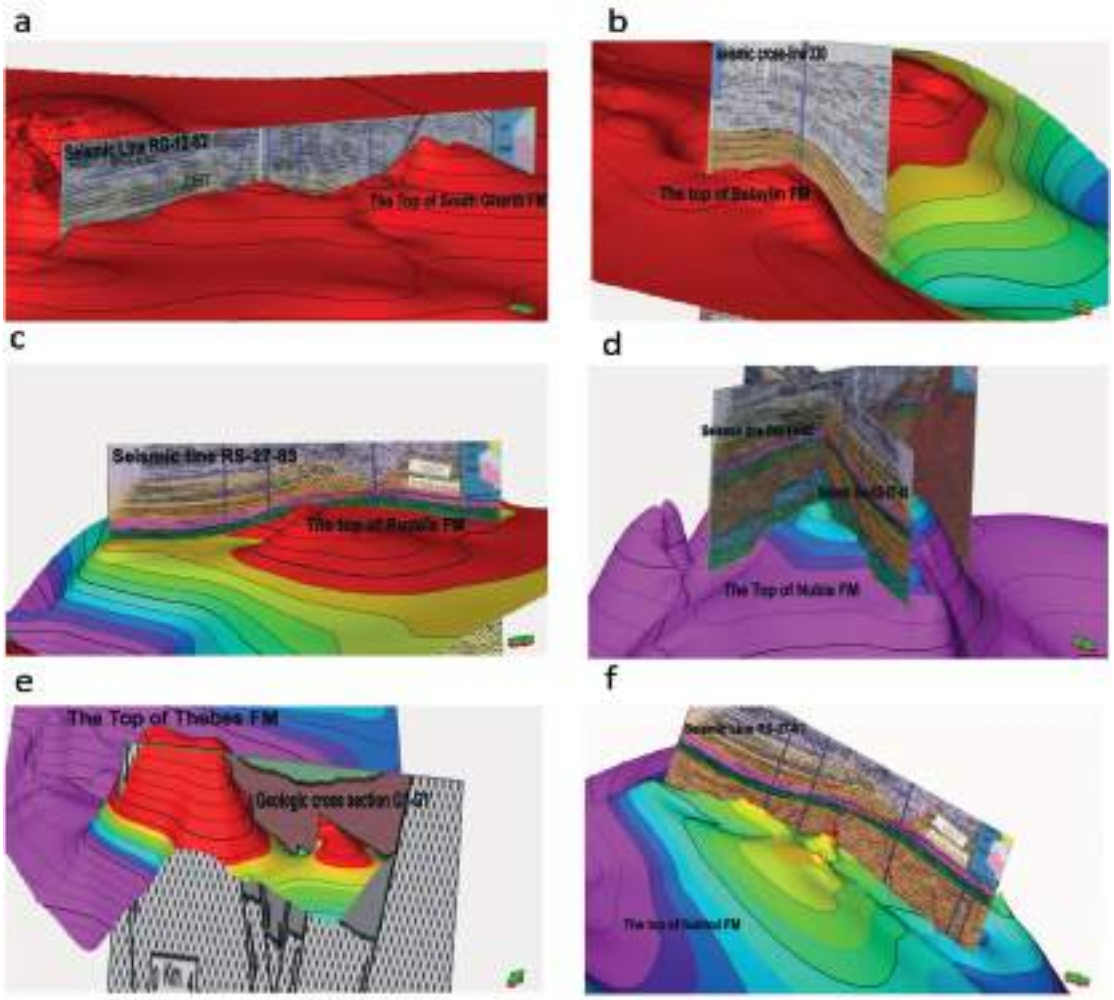


Figure 7. The tops. a – South Gharib Formation at seismic line RG-12-82; b – Belayim Formation at 3D seismic cross-line 330; c – Rudeis Formation at seismic line RS-27-83; d – Nubia Formation at crossing seismic lines RS27-83 and RG 14-82; e – Thebes Formation at geological cross section G1-G1'; f – Nukhul Formation at seismic line RS-27-83.

Рисунок 7. Вершины. a – Южно-Гарибская свита на сейсмической линии RG-12-82; b – Белаймская свита на 3D сейсмическом разрезе 330; c – Рудейская свита на сейсмической линии PC-27-83; d – Нубийская свита при пересечении сейсмических линий RS27-83 и RG 14-82; e – Фивская свита на геологическом разрезе G1-G1'; f – Нухульская свита на сейсмической линии PC-27-83.

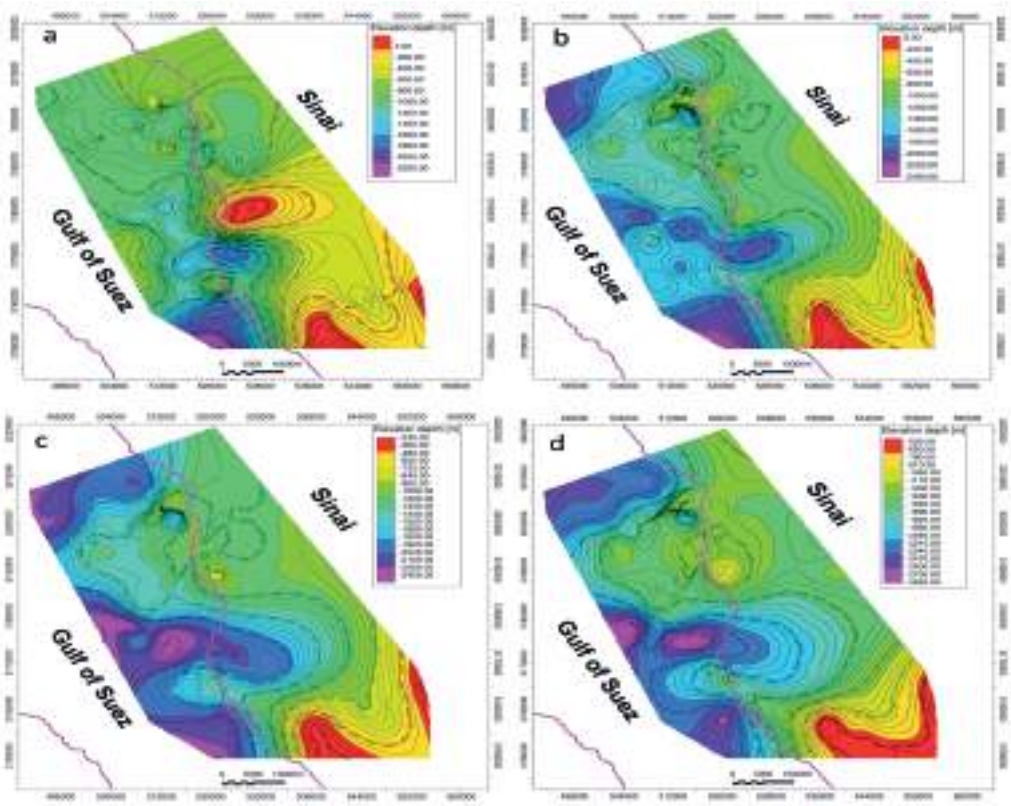


Figure 8. Structure contour maps: of a – the top Zeit Formation; b – the top South Gharib Formation; c – the top Belayim Formation; d – the top Kareem Formation of the study area.

Рисунок 8. Структурные контурные карты: a – вершина Зейт-формации; b – верхняя формация Южного Гариба; c – верхняя Белаймская свита; d – верхняя Каримская свита района исследования.

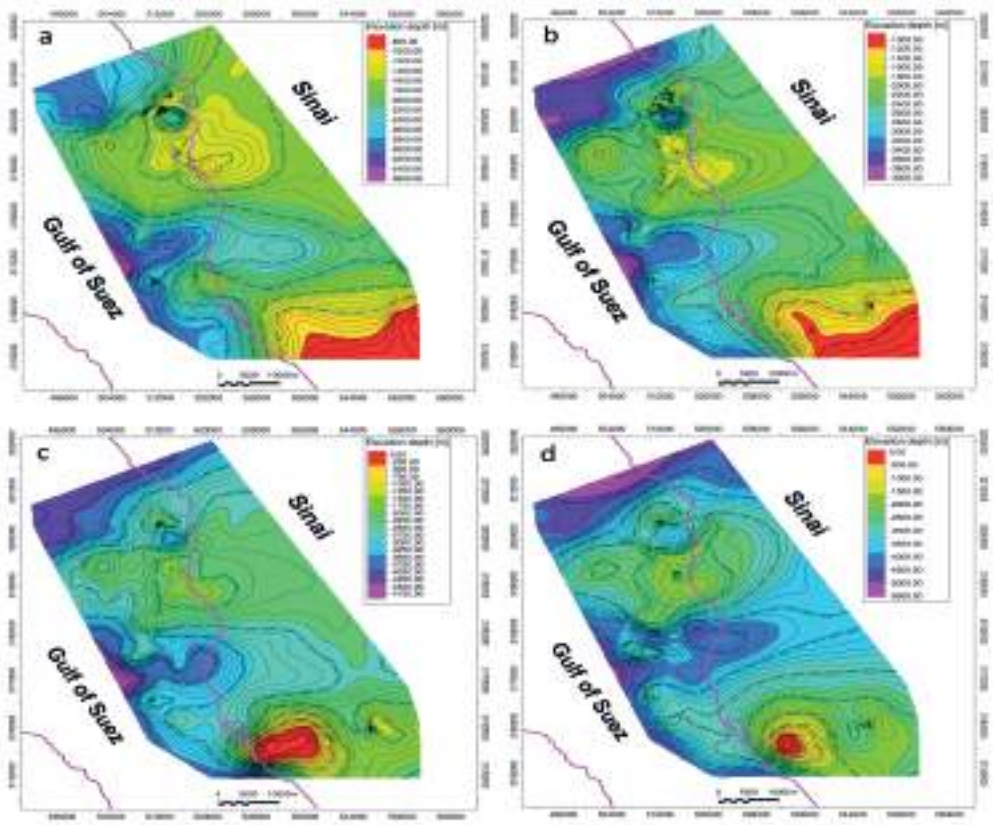


Figure 9. Structure contour map of: a – the top Rudeis Formation; b – the top Nukhul Formation; c – the top Thebes Formation; d – the top Matulla Formation of the study area.

Рисунок 9. Структура контурной карты: a – верхней Рудейской свиты; b – верхней Нухульской свиты; c – верхней Фивской свиты; d – кровля Матуллской свиты района исследования.

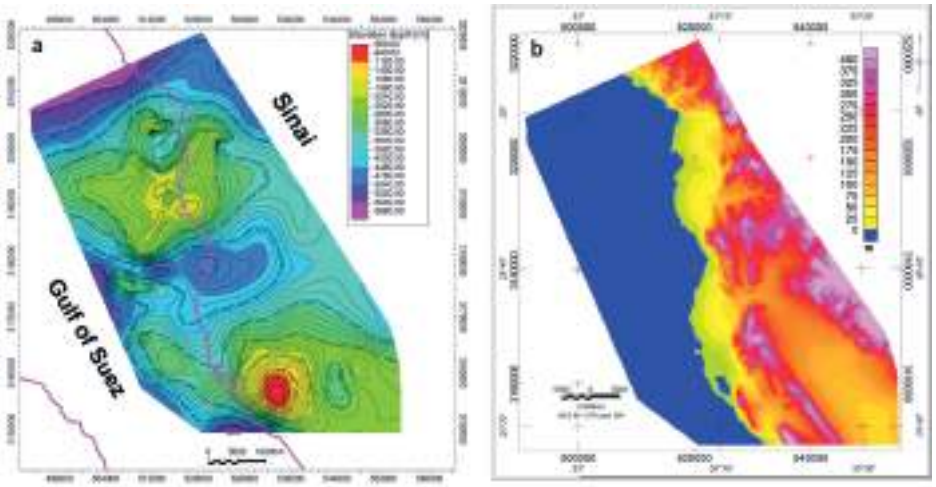


Figure 10. Structure and topographic maps. a – structure contour map of the top Nubia Formation; b – SRTM digital elevation model of the study area.

Рисунок 10. Структура и топографические карты. a – структура контурной карты верхней Нубийской свиты; b – SRTM цифровая модель рельефа района исследования.

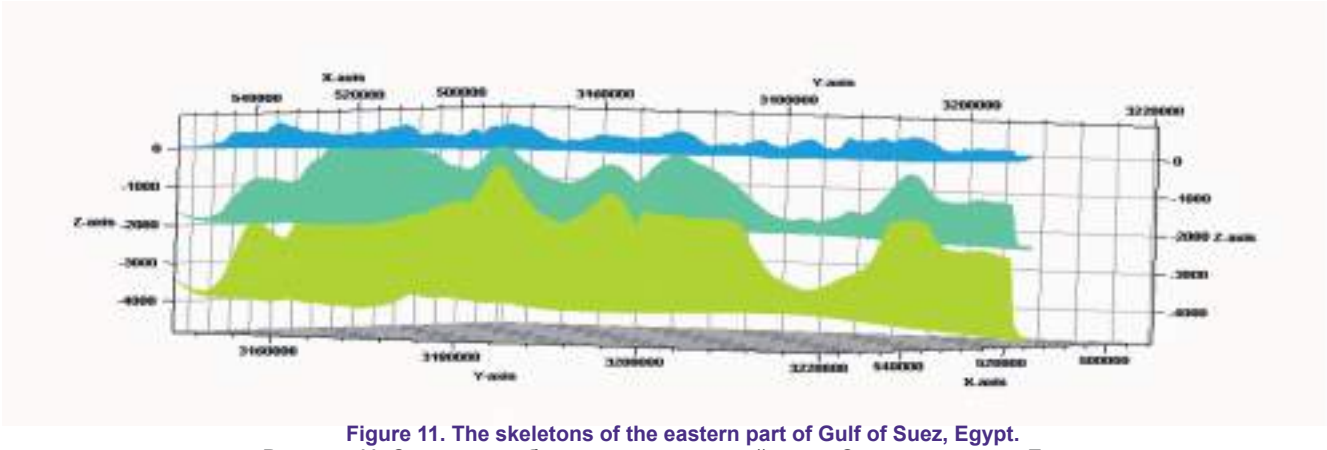


Figure 11. The skeletons of the eastern part of Gulf of Suez, Egypt.

Рисунок 11. Скелетные образования восточной части Суэцкого залива, Египет.

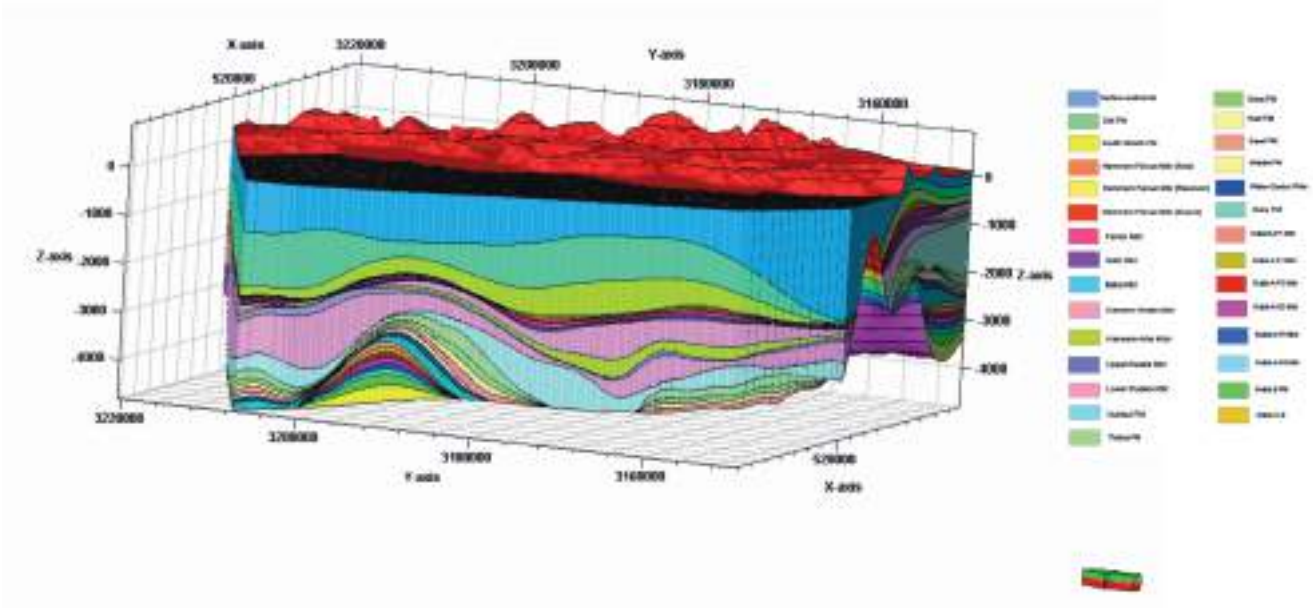


Figure 12. 3D based structure modelling using Petrel software of the study area.

Рисунок 12. Трехмерное моделирование структуры с использованием программного обеспечения Petrel исследуемой территории.

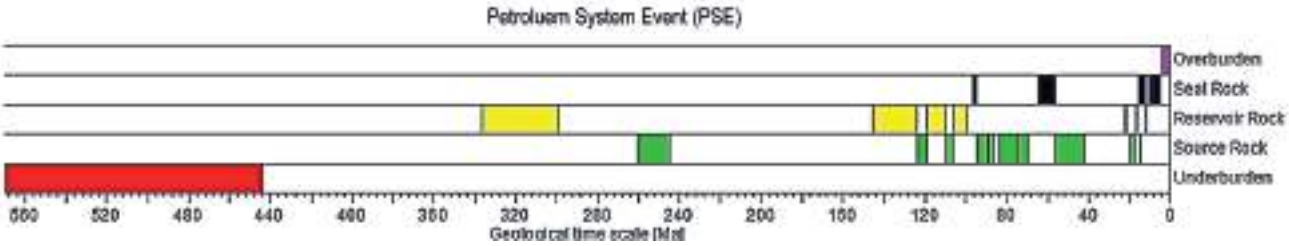


Figure 13. Petroleum system event chart, eastern part of Gulf of Suez, Egypt.
Рисунок 13. Схема событий нефтяной системы, восточная часть Суэцкого залива, Египет.

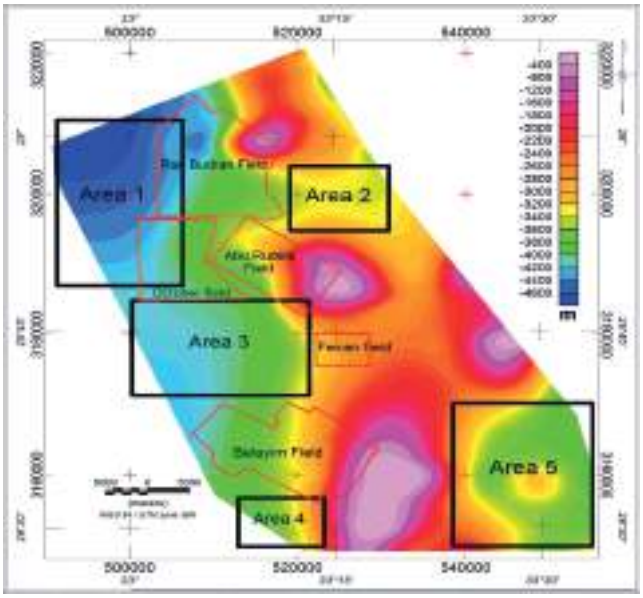
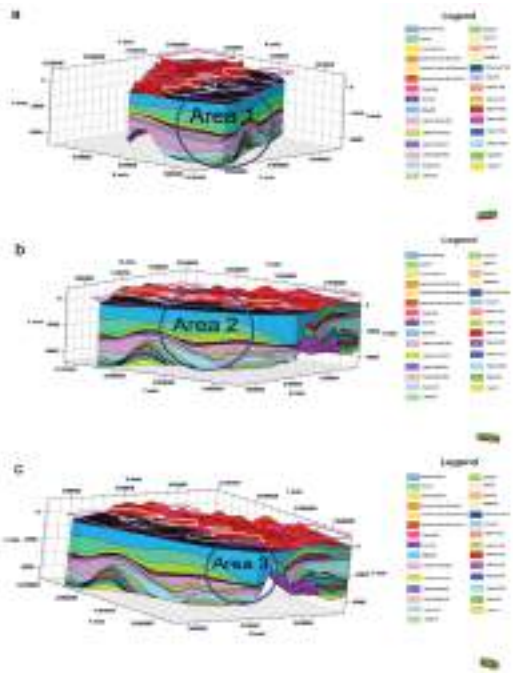


Figure 14. 3D magnetic depth map of the top basement rocks showing the promising zones for hydrocarbon of the study area.
Рисунок 14. Трехмерная магнитная карта глубины верхних пород фундамента, показывающая перспективные зоны для углеводородов исследуемой территории.



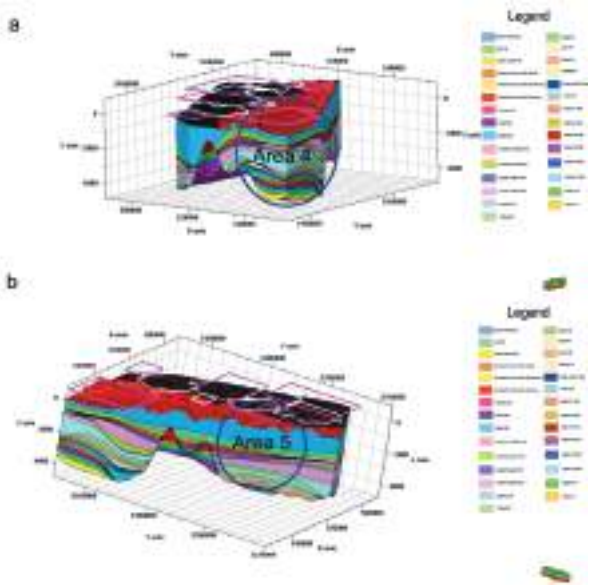


Figure 15. 3D modelling views of the promising zones 1, 2 and 3 using Petrel software, central eastern part of Gulf of Suez, Egypt.
Рисунок 15. 3D-моделирование перспективных зон 1, 2 и 3 с использованием программного обеспечения Petrel, центральная восточная часть Суэцкого залива, Египет.

Figure 16. 3D modelling views of the promising zones 4 and 5 using Petrel software, central eastern part of Gulf of Suez, Egypt.
Рисунок 16. 3D-моделирование перспективных зон 4 и 5 с использованием программного обеспечения Petrel, центральная восточная часть Суэцкого залива, Египет.

tentiality in other locations in the area is very high because of the existence of the sedimentary succession which allows trap forming characteristics (source, reservoir and sealing rocks). The boundaries of the currently known oil fields were plotted on top of the study area (Fig. 14) to predict new promising areas that may have potential for hydrocarbon and have not been fully explored.

The results of the 3D modelling (Fig. 15, 16) show that there are five locations within the study area that are considered to be basins, where the depth to the basement ranges from 3000 to 4500 m, in addition to the existence of a thick succession of sedimentary rocks overlaying the basement rocks. These areas need more attention through the use of 2D and 3D seismic surveys to explore new accumulations of hydrocarbons. The sedimentary succession for these areas includes seven reservoirs which are often overlain by seal rocks. These reservoirs can be divided into two types: pre-rift reservoirs and synrift reservoirs. Nubia A Sandstone-P1, Nubia A Sandstone-P2, Nubia A Sandstone-P3 are pre-rift reservoirs. The lithology of these reservoirs is mainly sandstone and each is overlain by a layer of shale which is considered a sealing rock. The Nukhul and upper Rudeis formations are synrift reservoirs. These reservoirs are sandstone and conglomerate that are overlain by a sealing rock.

Area (1) in the northwestern part of the study area (Fig. 15, a) is characterised by a great depth to the basement, which reaches 4500 m. The sedimentary succession in this area contains an adequate thickness of Belayim, Rudeis and Nubia A formations, which are considered good reservoirs. Oil and gas has been already discovered in these reservoirs in some other fields within the area, so we recommend undertaking 2D and 3D seismic surveys in this area to determine the probable presence of hydrocarbon. The depth to the basement in area (2), in the eastern part of the study area (Fig. 15, b), reaches 3000 m. Area (3) is in the central western part of the area to the south west of the Abu Rudeis field (Fig. 15, c). The depth to basement in this area is 4200 m, and the probability of the existence of hydrocarbon is increased in the Nukhul, Rudeis and Nubia A formations, as the lithology of these formations is good carrier rock, overlain by sealing rocks. In area (4) (Fig. 16, a), the depth to basement reaches 3600 m. This area is located in the southwestern part of the study area and it is located to the south of Belayim oil field which is one of the biggest oil fields in the GOS. The main reservoir in this field includes the Belayim and Nubia sandstones formations. One of the most important and promising areas in the study area is area (5) in the southeastern part (Fig. 16, b). No activity was undertaken in this area; however the probability of hydrocarbon accumulation may be very high. The depth to the basement in this area reaches 4100 m. 2D and 3D seismic surveys will be very useful so as to obtain detailed information about the subsurface geology, and a geochemical analysis to obtain information about the organic matter in the source rocks, where there is a thick sedimentary succession over the basement layer containing good multiple reservoirs, such as those in the Rudeis, Nukhul and Nubia formations. These reservoirs may be underlain by a good source rock. In a future study we will use this model and collect information about the heat flow, paleowater depth, organic matter, type of kerogen, and kinetics. Using this information we will be able to predict the locations and amounts of oil and gas that has accumulated in the reservoirs, by making a petroleum system model (PSM).

Conclusion

3D modelling of the airborne magnetic data was undertaken to delineate the depth to basement in the area under study. The results show that estimates of the depth to the basement varies reliably between 500 and 4700 m. 3D based structure model was created using Petrel software, depending on the available seismic sections and well data. The results of the 3D modelling show that there are five locations within the study area that are considered basins, where the depth to the basement varies between 3000 and 4500 m, and there is a good succession of sedimentary rocks overlaying the basement layer. These areas need more attention through 2D and 3D seismic survey to explore new accumulations of hydrocarbons. Making a petroleum system model (PSM) using the information about heat flow, paleowater depth, organic matter, type of kerogen, and kinetics will be very important for predicting the locations and amount of oil and gas accumulated in the reservoirs within the study area.

Acknowledgments

The authors would like to thank Nuclear Materials Authority for releasing the airborne magnetic data and for providing the necessary information and facilities to accomplish this work. Also, the authors would like to thank the Department of Geophysics at Saint Petersburg State University for allowing the use of the necessary software to accomplish this work.

REFERENCES

1. McClay K. R., Nichols G. J., Khalil S. M., Darwish M., Bosworth W. 1998, Extensional tectonics and sedimentation, eastern Gulf of Suez, Egypt. In: B. H. Purser, D. W. J. Bosence (Eds.). Sedimentation and tectonics in Rift Basins Red Sea: Gulf of Aden. Dordrecht, Springer, pp. 223–238. https://doi.org/10.1007/978-94-011-4930-3_14
2. Moustafa A. R. 2004, Explanatory Notes for the Geologic Maps of the Eastern Side of the Suez Rift (Western Sinai Peninsula). AAPG/Datapages, Incorporated GIS Series, Cairo.
3. Abdeen M. M., Abdelmaksoud A. S. 2014, Aqaba-Levant transform-related faults in the Gulf of Suez rift: The Durba–Araba fault, Sinai Peninsula, Egypt. *Journal of African Earth Sciences*, vol. 97, pp. 342–356. https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2014.05.013
4. Moustafa A. R., Khalil S. M. 2017, Control of extensional transfer zones on syntecronic and post-tecronic sedimentation: implications for hydrocarbon exploration. *Journal of the Geological Society*, vol. 174, pp. 318–335. https://doi.org/10.1144/jgs2015-138
5. Alsharhan A. S. 2003, Petroleum geology and potential hydrocarbon plays in the Gulf of Suez rift basin, Egypt. *AAPG Bulletin*, vol. 87, pp. 143–180.
6. IHS E. 2006, Gulf of Suez Basin Monitor. Iris21 ID: 410900. IHS Energy.
7. Caumon G., Carlier de Veslud C., Viseur S., Sausse J. 2009, Surface-based 3D modeling of geological structures. *International Association for Mathematical Geosciences, Math Geosci.*, vol. 41, pp. 927–945. https://doi.org/10.1007/s11004-009-9244-2
8. Branets L. V., Ghai S. S., Lyons S. L., Xiao-Hui Wu. 2009, Challenges and technologies in reservoir modelling. *Communication in Computational Physics*, vol. 6, pp. 1–23. https://doi.org/10.4208/cicp.2009.v6.p1 какая-то ошибка-не открывается
9. Al-Baldawi B. A. 2015, Building a 3D geological model using Petrel Software for Asmari Reservoir, South Eastern Iraq. *Iraqi Journal of Science*, vol. 56, pp. 1750–1762.
10. Shimanskiy S. V., Tarshan A. 2019, Basement configuration depth methods of airborne magnetic data in the eastern Gulf of Suez, Egypt. *News of the Ural State Mining University Journal*, vol. 53, issue 1, pp. 7–17. https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-1-7-17
11. Mokhles A., Mostafa M., Desouky I., Pepe F. 2003, Impact of 3D seismic technique on production optimization in Belayim Land Field, Central Gulf of Suez, Egypt. The Offshore Mediterranean Conference: An Exhibition in Ravenna, Italy, March 26–28.
12. Zahra H. S., Nakhla A. M. 2015, Deducing the subsurface geological conditions and structural framework of the NE Gulf of Suez area, using 2-D and 3-D seismic data. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, vol. 4, pp. 64–85. https://doi.org/10.1016/j.nrjag.2015.04.003
13. Zahra H. S., Nakhla A. M. 2016, Structural interpretation of seismic data of Abu Rudeis-Sidri area, Northern Central Gulf of Suez, Egypt. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, vol. 5, pp. 435–450. https://doi.org/10.1016/j.nrjag.2016.09.002
14. Rabeh T., Miranda J. M., Carvalho J., Bocin A. 2009, Interpretation case study of the Sahl El Qaa area, southern Sinai Peninsula, Egypt. *Ge-*

ophysical Prospecting, vol. 57, issue 3, pp. 447–459. https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.2008.00747.x
15. Tarshan A., Shimanskiy S. 2019, Petroleum system modelling and identification of promising oil and gas bearing objects in the eastern part of the Gulf of Suez, Egypt. *Russian Journal of Earth Sciences* [In press].
16. Abou Shagar S. 2006, Source rock evaluation of some intervals in the Gulf of Suez area, Egypt. *Egyptian Journal of Aquatic Research*, vol. 32, pp. 70–87.
17. Lashin A., Al-Arifi N., Abu Ashour N. 2011, Evaluation of the ASL and Hawara formations using seismic- and log-derived properties, October Oil Field, Gulf of Suez, Egypt. *Arabian Journal of Geosciences*, vol. 4, issue 3-4, pp. 365–383. https://doi.org/10.1007/s12517-009-0065-x
18. Naglaa M. S., Nabil S. A., Ahmed E. K. M. 2013, Hydrocarbon generating basins and migration pathways in the Gulf of Suez, Egypt. *Life Science Journal*, vol. 10, pp. 229–235.
19. Atia H. M. 2014, An integrative modeling of Ras Budran Field, Gulf of Suez, Egypt. Unpublished MSc. Thesis. Mansoura: Mansoura University, Egypt.
20. Mohamed H. B. 2014, Radiogenic heat production and reservoir properties of Rudeis Formation in Belayim Marine oil field, Gulf of Suez, Egypt. Unpublished MSc. Thesis. Cairo: Ain Shams University. Egypt.
21. Al-Atta M. A., Issa G. I., Ahmed M. A., Afife M. M. 2014, Source rock evaluation and organic geochemistry of Belayim Marine Oil Field, Gulf of Suez, Egypt. *Egyptian Journal of Petroleum*, vol. 23, issue 3, pp. 285–302. https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2014.08.005
22. Abu Al-Atta M.A. 2015, Hydrocarbon exploration and tectonic evolution of Belayim Marine Oil Field, Gulf of Suez, Egypt. Unpublished M.Sc. Thesis, Mansoura: Mansoura University, Egypt.
23. Afife M. M., Al-Atta M. A., Ahmed M. A., Issa G. I. 2016, Thermal maturity and hydrocarbon generation of the Dawi Formation, Belayim Marine Oil Field, Gulf of Suez, Egypt: a 1D basin modelling case study. *Arabian Journal of Geosciences*, vol. 9, pp. 1–31. https://doi.org/10.1007/s12517-016-2320-2
24. El Diasty W. Sh., Abo Ghonaim A. A., Mostafa A. R., El Beialy S. Y., Edwards K. J. 2016, Biomarker characteristics of the Turonian–Eocene succession, Belayim oil fields, central Gulf of Suez, Egypt. *Journal of the Association of Arab Universities for Basic and Applied Sciences*, vol. 19, issue 1, pp. 91–100. https://doi.org/10.1016/j.jaubas.2014.06.001

The article was received on February 20, 2019

УДК 550.8+550.34+ 553.98 https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-3-7-19

Трехмерное глубинное структурное моделирование центральной восточной части Суэцкого залива, Египет

Ахмед ТАРШАН[1, 2*],
Сергей Владимирович ШИМАНСКИЙ[1**],
Мамдух М. АБДИН[3***]

[1]Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия
[2]Управление по ядерным материалам, Каир, Египет
[3]Национальное управление по дистанционному зондированию и космической науке, Каир, Египет

Актуальность. Построение трехмерной (3D) геологической модели на основе полевых материалов и данных о строении земли является важной задачей в геологических и геофизических исследованиях.
Целью данного исследования является построение трехмерной структурной модели центральной восточной части Суэцкого залива, Египет. При построении модели использовались данные о сейсмических разрезах и скважинах. Каждый горизонт (на каждом сейсмическом разрезе) был точно оцифрован с использованием программного обеспечения Petrel для создания карты структуры глубины для каждого горизонта. Слой фундамента был сформирован с использованием данных аэромагниторазведки исследуемой области. Использовался инверсионный код GM–SYS–3D для предположения о магнитной восприимчивости комплекса пород фундамента. Оценки глубины до основания достоверно варьировались от 500 до 4700 м. Данные по 24 пробуренным скважинам в пределах области были использованы для определения толщины и ориентации слоев между горизонтами трехмерной модели сетки. Модель, состоящая из 29 слоев, включая топографию и слои фундамента, была создана с использованием программного обеспечения Petrel.
Результаты 3D-модели показывают, что область исследования имеет многоколлекторный характер с несколькими продуктивными предрифтовыми и синрифтовыми коллекторами. В ней содержаться семь резервуаров, перекрытых флюидоупорными породами и подстилаемых материнскими породами. Наличие углеводородов в этих резервуарах было продемонстрировано на некоторых месторождениях в этом районе. Кроме того, для детальной 2D и 3D сейсморазведки рекомендованы пять новых мест, так как в них может присутствовать углеводород.

Ключевые слова: 3D моделирование, карты глубинной структуры, горизонты и слои, Суэцкий залив, Египет.

Статья поступила в редакцию 20 февраля 2019 г.

* ✉ahmed_ramadan_geo@hotmail.com
https://orcid.org/0000-0001-9710-9392
**s.shimanskii@spbu.ru
https://orcid.org/0000-0002-5403-5220
***mamdouh.abdeen@narss.sci.eg
https://orcid.org/0000-0001-8863-1322

УДК 551.7.02 https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-3-20-26

Paleovolcanic model for the evolution of the basement complex of the central part of Egyptian Eastern Desert

Abdelhalim Shokry MAHMOUD[1,2*],
Victor Vasilievich DYAKONOV[1**]

[1]Russian State Geological Prospecting University, Moscow, Russia
[2]Fayoum University, Fayoum, Egypt

Relevance of the work. This article emphasizes the geological history of the accumulation of a thick volcanic, volcano-sedimentary, and sedimentary sequence around the Meatiq metamorphic core, the emplacement of its magmatic intrusions and the influence of tectonics during its formation. This study will help in expanding the natural resource base in the Egyptian Eastern Desert.
Purpose of the work. To clarify the geological setting of the studied territory, give an interpretation for its evolution and establish specific directions for exploration its ore deposits, based on our research results and previous works.
Methodology of research. Firstly, methods of comparative analysis of paleovolcanic structures were used to identify the sequence of orogenesis. Secondly, the study of stratigraphy, geological mapping, the spatial distribution of rock units, the form of fault systems distribution, and structural analysis. Thirdly, the creation of a model with schematic illustrations of geological sections.
Results of the work. The results of the study clearly indicate the long duration of geological processes that continued for at least two main tecto-no-magmatic epochs (Cadomian – with a duration of 120 Ma, and Salairian – 110 Ma).
Area of work application. The results of this paper can be used to identify several economic deposits, such as volcanic massive sulfides, copper porphyry deposits, etc.
Conclusions. The rock assemblage of the area around Meatiq dome represents a huge Archean-Neoproterozoic paleovolcanic structure. This structure is composed of gneissic cores intruding in an older platform cover of metasediments and upper two main successive tectonic-magmatic cycles which rejuvenated the lower older gneisses.

Keywords: Meatiq, paleovolcanic structure, tectono-magmatic cycle, Eastern Desert, stratigraphy, magmatism, Egypt.

Introduction

The basement complex of the Eastern Desert is located within a large platform structure known as the Arabian-Nubian Shield (ANS) which represents the northern extension of the East African Orogen (EAO). Previous studies divided this complex into two main tectonostratigraphic units [1–3]. The lower structural unit, or infrastructure, consists of metamorphic rocks (gneiss, schists, amphibolites, etc.), grouped in dome-shaped structures, such as the Migif, Meatiq and Sibai domes. Above there are rocks of the upper structural unit or superstructure, represented by metasediments, and metavolcanic rocks which called ophiolitic mélange [4]. The tectonic evolution of the ANS has been discussed by many authors produced the following proposed models, summarized by Hamimi et al. [5].

(1) Infracrustal orogenic model, that considered the high-grade gneisses and migmatites as an old craton that were over thrusted by ophiolites and island arc volcanics and volcaniclastics, and remobilized equivalents during the Neoproterozoic time [1, 6, 7, 8].

(2) Turkic-type orogenic model, that considered much of the ANS formed in broad fore-arc complexes that involved the growth of a subcontinent-size subduction-accretion complexes, into which magmatic arc axes commonly migrate and thus enlarge their attached continent [9].

(3) Hot-spot model, that considered much of the ANS formed due to the accretion of the oceanic plateau by upwelling mantle plumes [10].

(4) Arc accretion (arc assembly) model, that considered the EAO as a juvenile crust that was generated around and within a Pacific-sized ocean (Mozambique Ocean). This model was proposed first by [11, 12], and modified by [13].

Here we present a new interpretation for the development of the basement complex around the Meatiq dome based on the model of the paleovolcanic structure. The theoretical concepts of this model are presented in details by [14, 15]. This territory in the central Eastern Desert of Egypt, is favorable for the reconstructions paleovolcanic structure. Here it was possible to identify a huge Archean-Neoproterozoic paleovolcanic structure with the center is located in the area of the Meatiq dome, forming an oval shape measuring about 60*30 km (Fig. 1).

Stratigraphy

A thick old platform cover of various metamorphosed terrigenous deposits outcrop within the whole area of the Eastern Desert. Hashad [18] considered it the oldest rock unit of the Egyptian basement except for some highly metamorphosed gneisses (Table). They form an oval shape around the gneiss dome of Meatiq (Fig. 1, 2, a). According to Sabet et al., [19], fine-grained types predominate to the northwestern part from the Meatiq dome, while in the southeastern part, coarse-grained clastics to conglomerates are the main types, where the transition between them is gradational. This platform cover separates the planetary stage represented by the highly metamorphosed rocks from the geologic stage represented by all the above laying units. The gneisses are exposed in gneiss domes as a result of subsequent intensive erosion across the EDSZ "Eastern Desert Shear Zone" [20] and considered as erosion windows in the metamorphosed platform cover. Based on their structural and stratigraphic position, El Gaby et al., [1, 21] considered

* halim.geologist@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-4777-8210
** mdf.rudn@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-9153-6489

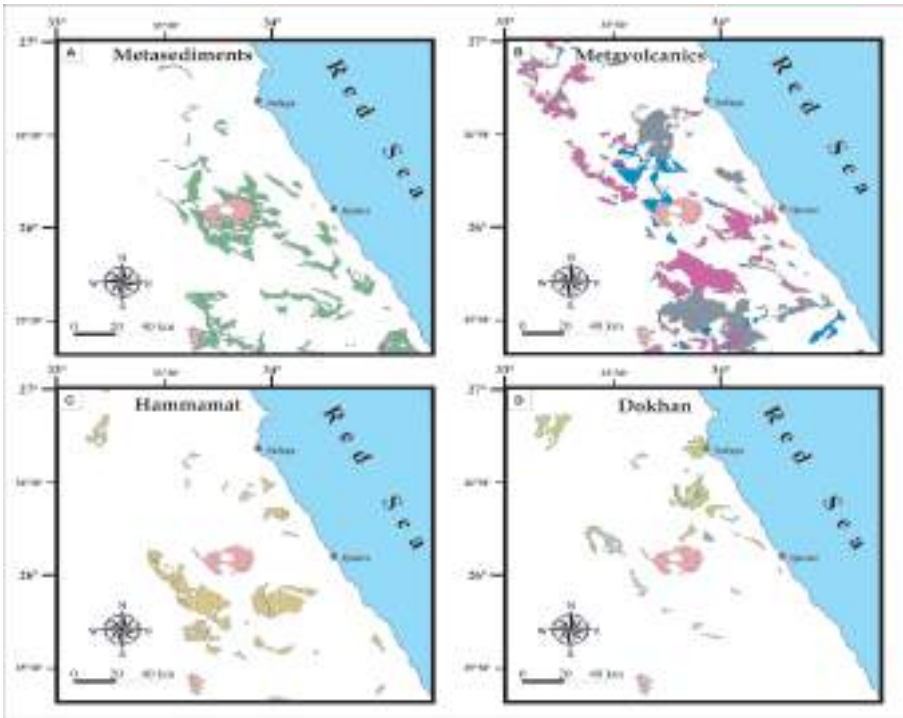


Figure 1. Meatiq paleovolcanic structure. a – Geological map of the territory around Meatiq dome (After [16]); b, c – schematic geological cross section across the Meatiq dome (After [17]). 1 – Mostly melanocratic, medium to high grade gneisses and schists» 2 – metasediments (metamorphosed shelf sediments with pyroclastics); 3 – Serpentinites, talc-carbonate and related rocks; 4 – Metagabbro; 5 – Metagabbro to metadiorite undifferentiated; 6 – Intrusive Metagabbro to metadiorite; 7 – basic metavolcanics; 8 – felsic to intermediate metavolcanics with metapyroclastics; 9 – undifferentiated metavolcanics; 10 – Older granitoids (Calc-alkaline quartz diorite to granodiorite); 11 – Younger granitoids (alkaline alkali-feldspar granite); 12 – Hammamat clastics (Molasse-type conglomerates to siltstone); 13 – Andesitic Dokhan volcanic; 14 – Rhyolitic Dokhan volcanics (or post-Hammamat felsite); 15 – fresh gabbro, norite and troctolite; 16 – Post-Hammamat felsite, felsite porphyry and quartz porphyry; 17 – trachyte plugs and sheets; 18 – Meso-Cenozoic sedimentary cover.

Рисунок 1. Палеовулканическая структура Митик. а – геологическая карта территории вокруг купола Митик (по [16] с редактированием); б, в – схематические геологические разрезы (по [17] с редактированием). 1 – в основном меланократовые гнейсы и сланцы средней и высокой степени метаморфизма; 2 – метаосадки (метаморфизованные шельфовые отложения); 3 – серпентиниты, тальк-карбонат и родственные породы; 4 – метагаббро; 5 – нерасчлененные метагаббро–метадиорит; 6 – интрузивные метагаббро–метадиориты; 7 – основные метавулканиты; 8 – кислые к среднными метавулканитами с метапирокластиками; 9 – нерасчлененные метавулканиты; 10 – более старые гранитоиды (известково-щелочные кварцевые диориты до гранодиоритов); 11 – младшие гранитоиды (щелочной полевой шпат гранит); 12 – обломочные породы группы Хаммамат (типа моласса от конгломератов к алевролитам); 13 – андезитовые вулканиты Дохан; 14 – риолито-доханские вулканиты (или постгаммаматский фельзит); 15 – свежие габбро, нориты и троктолиты; 16 – фельзиты постхаммамата, фельзитовый порфир и кварцевый порфир; 17 – пробки и листы трахита; 18 – мезокайнозойский осадочный чехол.

gneiss domes as pre-Neoproterozoic structures. However, the gneisses show younger absolute ages than overlaying metasediments and metavolcanics (Table). Stern [22] explained it due to the partial melting "rejuvenation" of gneisses during the deformation of the upper units. Andresen et al. [23] considered these younger ages to represent the main deformation event at Meatiq of 610–605 Ma.

The old pre-Neoproterozoic platform cover was exposed to main two cycles of tectono-magmatic activity. The first cycle is represented by the eruption of lava that formed the metavolcanic sequence and their tuffs. This cycle occurred in Archean-late Neoproterozoic during the Cadomian Orogeny. The main eruption center of this cycle is located in the Central Eastern Desert in the Meatiq dome. The Arieki and Abu Ziran granitoids (Fig. 1, a–c) in the central part of the Meatiq dome filled the place of the vent channels. The Meatiq formation is composed of two members: a) Umm Ba'anib granitic gneiss, and b) Abu Fannani metasediments including different types of quartz-feldspar and pelitic schists that reach several hundred meters thick. The metamorphic rocks of the Meatiq formation are covered by a thick succession of metavolcanic rocks along their northwestern part. Along the contact of Abu Fannani metasediments with the basic metavolcanics lies a 30 m thick basal horizon of the conglomerates, with pebbles from the lower underlying metamorphic rocks [24]. The Metavolcanics formation which is composed of two sheets a) The lower mafic sheet, which is associated with serpentinites (called Older Metavolcanics) and followed by b) The upper intermediate and acidic metavolcanic sheet (called Younger Metavolcanics, by Stern [25]) which is intercalated with tuffs and pyroclastics. These Metavolcanics and pyroclastics represent the development area of both distant and slope facies (Fig. 2, b). This first tectono-magmatic cycle was ended by the emplacement of the Older granitoids.

All the above-mentioned formations are uncomfortably covered by the second cycle of tectono-magmatic activation of the Salairian Orogeny. It began with the deposition of non-metamorphosed clastic "molasse-type" sediments called the Hammamat group; range from conglomerate to siltstone forming a major unconformity surface represented. Akaad and Noweir [6] subdivided the Hammamat group into the lower Igla Formation, consisting of sandstone, siltstone, and mudstone with a basal conglomerate, followed by the El Shihimiya Formation composed of conglomerate, greywacke, and sandstone.

The volcanic activity is represented by a stratified succession of lava flows of a wide spectrum of silica content called "Dokhan Volcanics Formation". It comprises two main rock suites: (a) Lower minor intermediate volcanic suite, composed of lower basaltic andesite, andesite, dacite sheet, and their associated pyroclastic rocks called "Older Dokhan Volcanics"; and (b) Upper thick felsic volcanic suite composed of dacite, rhyodacite, rhyolite, ignimbrite and rhyolitic tuffs collectively called "Younger Dokhan Volca-

Table. The geological history of the formation of Meatiq paleovolcanic structure.
Таблица. Геологическая история формирования палеовулканической структуры Митик.

Tectono-magmatic cycle	Formation	Member	Thickness, m	Lithology	Isotopic ages, Ma		Associated intrusives
					Min.	Max.	
Saliarian	Dokhan	Younger Dokhan	1200 (max.)	Rhyolite, dacite, tuffs	465 [26]	630 ± 6 [27]	Younger granitoids
		Older Dokhan		Basalt, basaltic andesite	–	–	
	Hammamat group	Fine-grained Hammamat	150–500	Greywackes, mudstone and siltstone with chert bands	585 ± 13 [28]	585 ± 15 [29]	
		Coarse-grained Hammamat		Conglomerate, sandstone, and breccia with basalt and andesite	–	–	
Cadomian	Metavolcanics	Younger Metavolcanics	1000–1500	Metarhyolite, metadacite, metaandesite and acidic tuffs	622 ± 6 [30]	1078 [31]	Older granitoids
		Older Metavolcanics	1500–2000	Metabasalt, metabasaltic andesite, metaandesite	640 [32]	2730 [32]	
Old platform cover	Metasediments	Fine-grained metasediments	3000	Tuffaceous sandstone, siltstone, gravel and conglomerate	1150 ± 60 [18]	2765 [32]	Serpentinites, amphibolites, and metagabbro-diorite complex
		Coarse-grained metasediments	1000	Medium to coarse-grained schists, greywackes, tuffs	–	–	
Pre-Neoproterozoic	Meatiq	Abu Fannani	1500	Pelitic and quartzo-feldspathic schists	595.9 ± 0.5 and 588.2 ± 0.3 [33]		
		Umm Ba'anib	> 550	Granitic gneiss	596 ± 15 [34]	779 ± 4 and 1150 for amphibolite xenoliths [35]	

Note: the given isotopic ages and method used are as the following techniques: [34] Rb–Sr, [35] $^{207}Pb/^{206}Pb$ single zircon, [3] $^{40}Ar/^{39}Ar$ Muscovite, [18] Rb/Sr, [32] U–Pb SHRIMP, [30] Rb–Sr, [31] Pb–Pb Galena, [28] SHRIMP U–Pb, [29] Rb–Sr whole-rock, [26] K–Ar, [27] SHRIMP U–Pb zircon.

nics" [36]. The post-Hammamat felsites are tensely associated with Dokhan volcanics. They are composed of rhyolite flows and tuffs [37]. Here it is considered to belonging to the Younger Dokhan volcanics. The Dokhan volcanics are intensively eroded and the present occurrences represent only a few remains (Fig. 2, d).

The time relation between Hammamat formation and the Dokhan volcanics is debated. El-Gaby et al., [1] and Akaad [38] established that the deposition of the Hammamat sediments was after the eruption of the Dokhan volcanics. Moghazi et al., [39] stated that the Hammamat sediments and Dokhan volcanics were formed contemporaneously. At many localities, however, an interfingering relationship between the two lithologies can be observed [40]. Multiple transport directions and closely spaced lateral facies changes in the Hammamat Group are common. The eruption of Dokhan volcanics apparently was probably synchronous with deposition of at least the upper units of the Hammamat Group and emplacement of the alkali Younger Granites. This second tectono-magmatic was ended by the extensive intrusion of granitic massifs. Unfortunately, we have no detailed data on the facial composition of volcanogenic and volcanogenic-sedimentary strata. Consequently, conducting a facies analysis today is unrealistic.

Small exposures of young Mesozoic and Cenozoic volcanics (200–300 Ma) of mainly trachytic composition (Trachyte sheets and plugs) are recorded in the studied territory, due to further reactivation of older fracture zones. Here they aren't discussed, because they don't play a vital role in the development of Meatiq paleovolcanic structure. The stratigraphic section ends with Meso-Cenozoic terrigenous sediments, which constitute a thick platform cover to west from the paleovolcanic structure.

Magmatism

Three periods of emplacement of magmatic intrusions that covered a large area of the Eastern Desert define the ends of each tectonic epoch. These intrusions range in composition from ultramafic to felsic.

The gneisses and upper platform metasedimentary cover were intruded by ultramafic and mafic intrusions including serpentinite, gabbroic, gabbro-dioritic complexes; in many places, serpentinites thrust over the whole sequence.

The end of the first tectono-magmatic cycle is characterized by the emplacement of huge felsic calc-alkaline masses of a mainly granodioritic composition formed the so-called Older "or grey" Granite. They bound along the outer contour of the metavolcanic sheet with small masses intruding the metasediments and gneisses in the central parts of the palevolcanic structure (Fig. 1).

The end of the second tectono-magmatic cycle is characterized by the emplacement of alkaline intrusions of granitic composition composed the Younger "or red" granite. They outcrop mainly along the outer contours of the Older Granitoids as in the Northern Eastern Desert (Fig. 1), with prominent higher relief relative.

The emplacement of the Younger granite is most likely predated the deposition of the Hammamat molasses as observed in many areas like Wadi Igla and Wadi Quieh. However, the long period of deposition of the Hammamat molasses to make it overlapped in a few areas. For example, in Wadi Zeidoun E the Younger granite form 5 m contact zone with Hammamat sediments, sending apophyses in them indicating younger ages of granite [41].

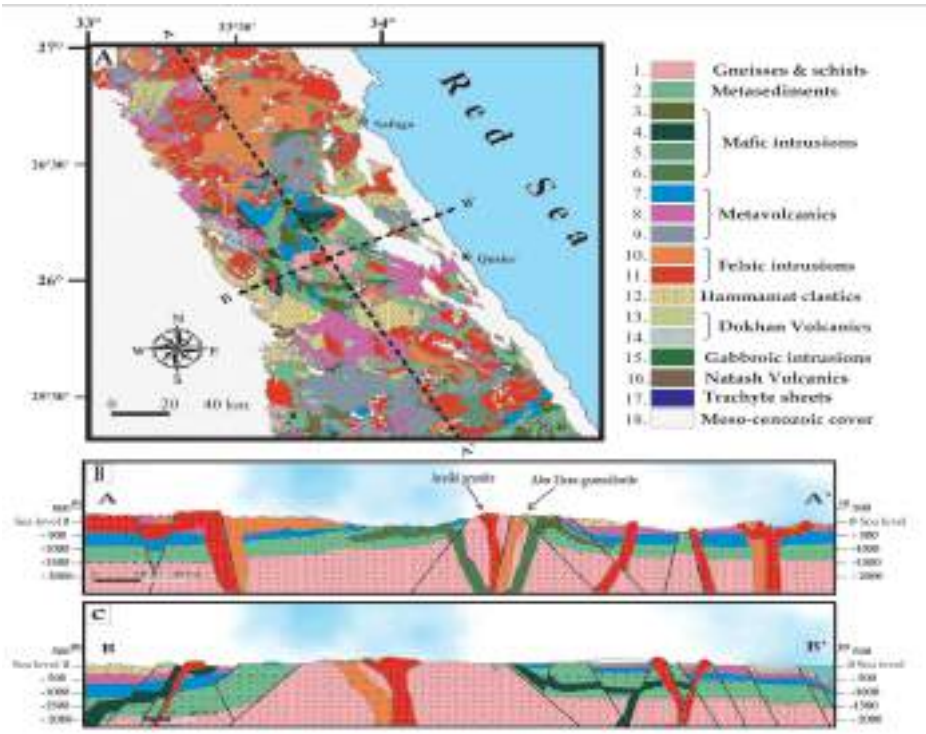


Figure 2. Geological maps illustrating the spatial distribution of a – Metasediments; b – Metavolcanics; c – Hammamat clastics, Dokhan volcanics around Meatiq gneiss core and other gneiss exposures (After [16]).

Рисунок 2. Геологические карты, иллюстрирующие пространственное распределение. a – метаосадков; b – метавулканитов; c – обломочных пород Хаммамат; d – вулканитов Дохан вокруг гнейсового ядра Митик и других обнажений (по [16] с редактированием).

Tectonics

The fault system in this territory represents two cycles of development, (a) Older Fault System (OFS) was formed at the earlier stages of the development of the paleovolcanic structure. It is expressed by fragments of radial faults of different directions directed from the center of the Meatiq structure, and fragments of concentric faults encircling the Meatiq structure and later magmatic intrusions (Fig. 3). They are most likely correspond to the time of doming of the gneisses and after the introduction of granitoids. The radial faults served as channels for the introduction of dikes and also areas of later hydrothermal solutions. Around the center of the Meatiq structure, volcanogenic-sedimentary, volcanogenic, and sedimentary strata were accumulated along these concen-

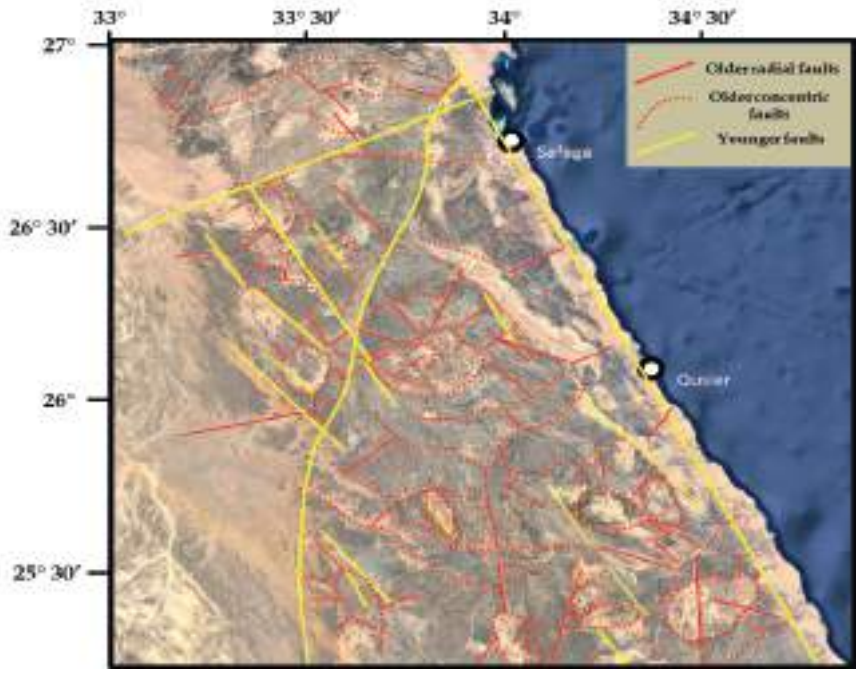


Figure 3. Older and younger fault systems of the studied territory.

Рисунок 3. Старые и молодые системы разломов изучаемой территории.

tric faults (Fig. 1–3). (b) Younger Fault system (YFS), represented by large faults of the NW strike and perpendicular to them that called the Najd Fault System. The Najd Fault System started after at the end of the formation of the paleovolcanic structure that equivalent to the Alpine Orogeny. The manifestation of YFS interrupted the radial and concentric faults led to the creation of a complex-folding mosaic block structure dominated by the vertical movement of large-sized blocks.

Many other items interrupted this paleovolcanic structure and hide many its features including, the extensive emergence of the granitic intrusions, Mesozoic and Cenozoic volcanics, and the thick Phanerozoic sedimentary cover. The study of the litho-stratigraphic sequence with the spatial distribution of rock units, field relations, previously recorded ages, etc. helps to construct this proposed model.

Summary

The rock assemblage of the area around Meatiq dome represents a huge Archean-Neoproterozoic paleovolcanic structure. According to the stratigraphic position, the oldest rock unit in the studied territory is represented by Umm Ba'anib granitic gneisses and Abu Fannani schists. The gneisses are covered with a thick platform cover of metasediments that was intruded by many mafic and ultramafic intrusions represented by metagabbro and serpentinites. The Meatiq gneisses were domed and rejuvenated during two subsequent tectono-magmatic cycles. The first cycle resulted in the formation of two metavolcanic sheets. The lower sheet has a basic composition which represents the development area of distant facies. The upper sheet has intermediate to acidic composition and intercalated with pyroclastics representing the development area of slope facies. The Older granitoids were emplaced at the end of this cycle. The second cycle is represented by the Dokhan volcanic series and separated from the first cycle by a major unconformity surface represented by the Hammamat group clastics. This cycle was ended with the intrusion of Younger granitoids. Radial and concentric faults developed around the Meatiq paleovolcanic structure and interrupted by more younger well-developed NW Najd Fault system faults and perpendicular to them.

REFERENCES

1. El-Gaby S., List F. K., Tehrani R. 1988, Geology, evolution and metallogenesis of the Pan-African Belt in Egypt. In: El Gaby S., Greilling R. O. (eds). The Pan-African belt of the northeast Africa and adjacent areas: tectonic evolution and economic aspects of a late Proterozoic orogen. Vieweg&Sons, Braunschweig/Wiesbaden, pp. 17–68.
2. Abdeen M. M., Greiling R. O. 2005, A quantitative structural study of late pan-African compressional deformation in the Central Eastern Desert (Egypt) during Gondwana assembly. *Gondwana Research*, vol. 8, issue 4, pp. 457–471. https://doi.org/10.1016/S1342-937X(05)71148-5
3. Abd El-Wahed M. A., Kamh S. Z. 2010, Pan-African dextral transpressive duplex and flower structure in the Central Eastern Desert of Egypt. *Gondwana Reserch*, vol. 18, issues 2–3, pp. 315–336. https://doi.org/10.1016/j.gr.2010.02.007
4. Shackleton R. M., Ries A. C., Graham R. H., Fitches W. R. 1980, Late Precambrian ophiolite mélange in the Eastern Desert of Egypt. *Nature*, vol. 285, pp. 472–474. https://doi.org/10.1038/285472a0
5. Hamimi Z., Abd El-Wahed M. A., Gahlan H. A., Kamh S. Z., 2019, Tectonics of the Eastern Desert of Egypt: Key to Understanding the Neoproterozoic Evolution of the Arabian–Nubian Shield (East African Orogen), The Geology of the Arab World–An Overview, Springer, pp. 1–81. https://doi.org/10.1007/978-3-319-96794-3_1
6. Akaad M. K., Noweir A. M. 1980, Geology and lithostratigraphy of the Arabian Desert orogenic belt of Egypt between latitudes 25°35′ S and 26°30′ N. *Inst. Appl. Geol. Jeddah Bull.*, vol. 3, pp.127–135. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-024481-5.50016-9
7. Abdel Khalek M. L., Takla M. A., Sehim A., Hamimi Z., El Manawi A. W. 1992, Geology and tectonic evolution of Wadi Beitan area, south Eastern Desert, Egypt. In: International Conference Geology. The Arab World, Cairo University, Egypt (GAW1), pp. 369–393.
8. Khudeir A. A., Asran A. H. 1992, Back-arc Wizr Ophiolites at Wadi Um Gheig district, Eastern Desert, Egypt. *Bull. Fac. Sci. Assiut Univ.*, vol. 21, pp. 1–22.
9. Sengör A. M. C., Natal'in B. A. 1996, Turkic-type orogeny and its role in the making of the continental crust. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, vol. 24, pp. 263–337. https://doi.org/10.1146/annurev.earth.24.1.263
10. Stein M., Goldstein S. L. 1996, From plume head to continental lithosphere in the Arabian Nubian shield. *Nature*, vol. 382, pp. 773–778. https://doi.org/10.1038/382773a0
11. Vail J. R. 1985, Pan-African (Late Precambrian) tectonic terrains and the reconstruction of the Arabian-Nubian shield. *Geology*, vol. 13, pp. 839–842. https://doi.org/10.1130/0091-7613(1985)13<839:PLPTTA>2.0.CO;2
12. Stoeser D. B., Camp V. E. 1985, Pan-African microplate accretion of the Arabian shield. *Geol. Soc. Am. Bull.*, vol. 96, № 7, pp. 817–826. https://doi.org/10.1130/0016-7606(1985)96<817:PMAOTA>2.0.CO;2
13. Stern R. J. 1994, Arc assembly and continental collision in the neoproterozoic East African orogen: implications for the consolidation of Gondwanaland. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, vol. 22, pp. 319–351.https://doi.org/10.1146/annurev.ea.22.050194.001535
14. Kotelnikov A. E. 2013, Mednogorsky paleovolcanic structure and prospects of its ore potential (PhD dissertation). Retrieved from Russian State Library (Storage location OD 61 13-4/54). (*In Russ.*)
15. Dyakonov V. V. 2011, Phanerozoic paleovolcanic structures and ore mineralization of copper-molybdenum porphyritic type (Doctoral dissertation). Retrieved from Russian State Library (Storage location OD 71 12-4/3). (*In Russ.*)
16. Coral Conoco, 1987, Geological map of Egypt, scale 1 : 500,000, The Egyptian General Petroleum Corporation, Cairo, Egypt.
17. EGSMA, 1979, Geological map of Egypt, Sheet NG-36 Aswan, scale 1 : 1000,000, The Egyptian Geological Survey and Mining Authority, Cairo, Egypt.
18. Hashad A. H. 1980, Present status of geochronological data on the Egyptian basement complex. *Inst. Appl. Geol. Jeddah Bull.,* vol. 3(3), pp. 31–46.
19. Sabet A. H., Bykov B. A., Berezin Y. P. 1977, Geological setting and ore deposits of the Bir Umm Fawakhir sheet, Internal report EGSMA, 57 p.
20. Andresen A., Augland L. E., Boghdady G. Y., Lundmark A. M., Elnady O. M., Hassan M. A., Abu El-Rus M. A. 2010, Structural constraints on the evolution of the Meatiq Gneiss Dome (Egypt), East African Orogen. *J. Afr Earth Sci.*, vol. 57, issue 5, pp. 413–422. https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2009.11.007
21. El-Gaby S., El Nady O., Khudeir A. 1984, Tectonic evolution of the basement complex in the central Eastern Desert of Egypt. *Geol. Rundsch.*, vol. 73, pp. 1019–1036. https://doi.org/10.1007/bf01820886
22. Stern R. J. 2018, Neoproterozoic formation and evolution of Eastern Desert continental crust – The importance of the infrastructure-superstructure transition. *Journal of African Earth Sciences*, vol. 146, pp. 15–27. http://dx.doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2017.01.001
23. Andresen A., Abu El-Rus M. A., Myhre P. I., Boghdady G. Y., Corfu F. 2009, U–Pb TIMS age constraints on the evolution of the Neoproterozoic Meatiq Gneiss Dome, Eastern Desert, Egypt. *Int. J. Earth Sci.* (*Geol. Rundsch.*), vol. 98 (3), pp. 481–497. https://doi.org/10.1007/s00531-007-0276-x
24. Habib M. E., Ahmed A. A., El Nady O. M. 1985, Two orogenies in the Meatiq area of the central Eastern Desert, Egypt. *Precambrian Research*, vol. 30, no. 2, pp. 83–111. https://doi.org/10.1016/0301-9268(85)90047-6
25. Stern R. J. 1979, Late Precambrian ensimatic volcanism in the Central Eastern Desert of Egypt. Ph.D. thesis. University of California, San Diego, USA, 420 p.

26. El-Ramly M. F. 1962, The absolute ages of some basement rocks from Egypt. Geol. Surv. Egypt, paper 15, 12 p.
27. Breitkreuz C., Eliwa H., Khalaf I., El Gameel K., Bühler B., Sergeev S., Larionov A., Murata M. 2010, Neoproterozoic SHRIMP U–Pb zircon ages of silica-rich Dokhan Volcanics in the northern Eastern Desert, Egypt. *Precambrian Research*, vol. 182, issue 3, pp. 163–174. https://doi.org/10.1016/j.precamres.2010.06.019
28. Wilde S. A., Youssef K. 2002, A re-evaluation of the origin and setting of the Late Precambrian Hammamat Group based on SIMS U–Pb dating of detrital zircons from Gebel Umm Tawat, North Eastern Desert, Egypt. *J. Geol. Soc*. vol. 159 (5), pp. 595–604. http://dx.doi.org/10.1144/0016-764901-081
29. Willis K. M., Stern R. J., Clauer N. 1988, Age and geochemistry of Late Precambrian sediments of the Hammamat Series from the North Eastern Desert of Egypt. *Precamb. Res*., vol. 42, issues 1–2, pp. 173–187. https://doi.org/10.1016/0301-9268(88)90016-2
30. Stern R. J., Hedge C. E. 1985, Geochronologic and isotopic constraints on Late Precambrian crustal evolution in the Eastern Desert of Egypt. *American Journal of Science*, vol. 285, pp. 97–127.
31. El-Kholy S. B., Selim E. T. M. 1971, Isotopic composition of some egyptian galena by thermal emission mass spectrometry. *Pure appl. Geoph*., vol. 87, issue 1, pp. 192–202.
32. Ali K. A., Stern R. J., Manton W. I., Kimura J.-I., Khamees H. A. 2009, Geochemistry, Nd isotopes and U–Pb SHRIMP zircon dating of Neoproterozoic volcanic rocks from the Central Eastern Desert of Egypt: New insights into the ~750 Ma crust-forming event. *Precambrian Research*, vol. 171, no. 1, pp. 1–22. https://doi.org/10.1016/j.precamres.2009.03.002
33. Fritz H., Wallbrecher E., Khudeir A. A., Abu El Ela F., Dallmeyer D. R. 1996, Formation of Neoproterozoic metamorphic complex during oblique convergence (Eastern Desert, Egypt). *Journal of African Earth Sciences*, vol. 23, issue 3, pp. 311–329. https://doi.org/10.1016/S0899-5362(97)00004-3
34. Liégeois J. P., Stern R. J. 2010, Sr–Nd isotopes and geochemistry of granite-gneiss complexes from the Meatiq and Hafafit domes, Eastern Desert, Egypt: No evidence for pre-Neoproterozoic crust. *Journal of African Earth Sciences*, vol. 57, issues 1–2, pp. 31–40. http://dx.doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2009.07.006
35. Loizenbauer J., Wallbrecher E., Fritz H., Neumayr P., Khudeir A.A., Kloetzli U. 2001, Structural geology, single zircon age and fluid inclusion studies of Meatiq metamorphic core complex: Implications for Neoproterozoic tectonics in the Eastern Desert of Egypt. *Precambrian Research*, vol. 110, issues 1–4, pp. 357–383. https://doi.org/10.1016/S0301-9268(01)00176-0
36. El-Gaby S. 2007, Integrated classification and evolution of the Neoproterozoic Pan-African belt in Egypt. The fifth international conference on the geology of Africa, vol. 1, pp. (V-143–V-154).
37. Essawy M. A., Abu Zeid K. M. 1972, Atalla felsite intrusion and its neighbouringrhylitic flows and tuffs, Eastern Desert, Egypt. *Ann. Geol. Surv. Egypt*. 2, pp. 271–280.
38. Akaad M.K. 1996, Rock succession of the basement: An autobiography and assessment. *The Geological Survey of Egypt*, vol. 71, pp. 1–78.
39. Moghazi A. M., Andersen T., Oweiss G. A., El Bouseily A. M. 1998, Geochemical and Sr–Nd–Pb isotopic data bearing on the origin of Pan-African granitoids in the Kid area, southeast Sinai, Egypt. *J. Geol. Soc*., vol. 155, № 4, pp. 697–710. https://doi.org/10.1144/gsjgs.155.4.0697
40. Abu Zied H. T. 1985, Wadi Hamrawein Upper volcanic sequence: a possible Late Proterozoic–Early Phanerozoic volcanic activity younger than Dokhan volcanics, Eastern Desert, Egypt. *Geol. Soc. Egypt* (abstract), pp. 17–18.
41. Rice A. H. N., Osman A. F., Sadek M. F., Abdeen M. M., Ragab A. I. 1993, Preliminary comparison of six late- to post-Pan-African molasses basins, Eastern Desert, Egypt. In: Thorweihe U., Schandelmeier H. (eds). Geoscientific Research in Northeast Africa. Balkema, Rotterdam, pp. 41–45.https://doi.org/10.1201/9780203753392

The article was received on March 25, 2019

УДК 551.7.2 https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-3-20-26

Палеовулканическая модель эволюции фундаментального комплекса центральной части Восточной пустыни Египта

Абдельхалим Шокры МАХМУД[1,2 *],
Виктор Васильевич ДЬЯКОНОВ[1 **]

[1]Российский государственный геологоразведочный университет (МГРИ-РГГРУ), Россия, Москва
[2]Университет Фаюма, Египет, Фаюм

Актуальность работы. В данной статье подчеркивается геологическая история накопления мощной последовательности вулканических, вулканоосадочных, осадочных пород вокруг метаморфического ядра Митик, внедрение ее магматических интрузий и влияние тектоники во время их формирования. Это исследование поможет в расширении базы природных ресурсов на территории Восточной пустыни Египта.
Цель работы: на основании результатов собственных исследований и анализа фондовых материалов уточнить геологическое строение исследуемой территории, дать новую интерпретацию ее эволюции и установить конкретные направления для разведки ее руд.
Методология исследования. Впервые использованы методы сравнительного анализа палеовулканических структур для целей выявления исторической последовательности орогенезов. Во-вторых, изучение стратиграфии, геологического картирования, пространственного распределения породных единиц, формы распределения систем разломов и структурного анализа. В-третьих, создание модели со схематическими иллюстрациями геологических разрезов.
Результаты выполненных исследований однозначно свидетельствуют о длительности геологических процессов, продолжавшихся как минимум на протяжении главных двух эпохи тектогенеза (Кадомская – протяженностью 120 млн лет, Салаирская – 110 млн лет).
Область применения работы. Результаты, описанные в статье, позволяют надеяться на выявление нескольких промышленных месторождений, таких как колчеданные, медно-порфировые и т. д.
Выводы. Породная ассоциация вокруг купола Митик представляет собой огромную палеовулканическую структуру архея–неопротерозоя. Эта структура состоит из гнейсовых ядер, внедряющих в более старый платформенный чехол метаосадков и двух верхних последовательных тектономагматических циклов, которые омолаживали нижние древние гнейсы.

Ключевые слова: Митик, палеовулканическая структура, тектономагматический цикл, Восточная пустыня, стратиграфия, магматизм, Египет.

Статья поступила в редакцию 25 марта 2019 г.

* halim.geologist@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-4777-8210
** mdf.rudn@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-9153-6489

УДК 551.7

https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-3-27-32

Paleogeomorphic depositional settings of the devon sediments of the pre-Caspian depression

Nadezhda Fedorovna FEDOROVA*

Astrakhan State University, Astrakhan, Russia

The relevance of the work. The Pre-Caspian depression is a wide stratigraphic range of industrial oil-and-gas potential. The discovery of a number of hydrocarbon deposits in recent decades is an important factor confirming the prospects of this territory. Features of sedimentation on the Earth's surface depend on the tectonic processes occurring at this time. The relevance of applying new research methods to discover hydrocarbon deposits, paleogeomorphic ones in particular, is shown. The study of paleogeomorphic factors of sedimentation in the Devonian sediments and taking into account the regional characteristics of paleotectonic development allows us to substantiate the prospects of oil-and-gas potential in this area. In this regard, it is necessary to develop and identify the dialectic unity between paleogeomorphology, paleotectonics and sedimentation, which will determine the patterns of formation and distribution of oil and gas fields.

The aim of the study is scientific justification of prospects of oil-and-gas potential and increase the forecast of the Devonian complex of sediments of the Pre-Caspian depression taking into account the influence of paleotectonic and paleogeomorphic factors.

The methodology of the study is based on identifying the role of the paleotectonic method in determining the oil-and-gas potential of a given region with a favorable combination of lithological-facies, geochemical, hydrogeological and thermobaric conditions.

Results. The author conducted some paleogeomorphic studies of patterns and conditions of sedimentation within the Astrakhan arch. It was found that throughout the Paleozoic time the geotectonic regime was a multiple alternation of movements of different signs. It was also revealed that numerous transgressions and regressions changed the conditions of sedimentation. Frequent movement of coastlines occurred within the territory, as well as breaks and disagreements within the island zones. As a result of the conducted works, it was found that modern structural plan of the Paleozoic sediments inherited the relief of the basement surface. While studying this issue, 3D OGT-64 three-dimensional seismic data and 2D seismic data were used, as well as core and slime materials from parametric well drilling data.

Conclusions. Research data of the territory of the Astrakhan arch based on paleogeomorphic analysis and the use of the results of geophysical and geological materials at the stage of identifying and preparing objects for prospecting and exploratory drilling allow us to study the formation of traps and reservoir rocks and assess the prospects for the oil-and-gas potential of this territory in the near future.

Keywords: Pre-Caspian depression, Astrakhan arch, paleotectonics, paleogeomorphology, sedimentation, Devonian sediments.

Introduction

The geological and economic efficiency of oil and gas exploration in the oil-and-gas provinces depends to a large extent on scientifically based forecasting of prospecting objects, which are the basis of ideas about the regularity of oil and gas deposits. The decisive role in this forecast belongs to the study of paleotectonic criteria of oil-and-gas potential. The theoretical basis for such a forecast is the sedimentary-migration theory of the origin of oil, to the development of which I.M. Gubkin, N. B. Vassoevich, A. A. Bakirov, V. L. Nalivkin et al. made a great contribution [1].

Features of sedimentation on the Earth's surface often depend on the tectonic processes occurring at this time. Differentiated uplifts and downwarpings ultimately form a surface relief with its characteristic forms. Marine geomorphology, which studies the origin and development of the bottom topography of marine basins unlike land geomorphology, is deprived of the possibility of visual observation and is based on indirect data (in paleoforecasts), mainly on the consideration of surfaces formed during breaks in sedimentation. Applied marine geomorphology helps to solve practical problems when searching for minerals, including oil and gas [2, 3].

A huge amount of organic matter and carbon is found in the sedimentary shell of the Earth. The predominant chemical elements of organic matter of both animal and plant origin are carbon and hydrogen. Plentiful and widespread organic matter fully ensures the accumulation of basic elements of oil and gas – carbon and hydrogen. In almost all non-reservoir rocks, such as clays and carbonates, the most diverse hydrocarbons and even oil have been found. The same hydrocarbons are found both in the disseminated state in fine-grained sediments and in the oils themselves [4].

For example, consistent stratigraphic analysis and geochemical methods have allowed Western scientists to study the accumulation of organic matter in the Upper Devonian Duverne Formation, in the sedimentary basin of Western Canada. This model showed a high relationship between the total concentrations of particulate organic carbon (POC) and the geochemical and organic petrological base [5].

Scientists have also established a link between certain sea level cycles and the accumulation of organic matter. Organic carbon is usually enriched while transgression of the sea and depleted during regression. Correlations between the total content of organic carbon and numerous geochemical indicators indicate that the accumulation of organic matter was controlled by redox conditions [6].

It should be noted that the distribution in the sediments of the initial organic matter necessary for oil and gas accumulation and oil and gas formation is interconnected. Higher concentrations of organic matter are inherent in clay rocks. Geochemical studies of the origin of the Middle Devonian Hamilton group of the Central Appalachian basin found that the Hamilton group includes Marcellus, organic-rich shale, one of the most profitable unconventional shale gases in the world [7].

Sapropelic differences are more characteristic of subaqueous precipitation, which is formed under conditions of maximum isolation from the influence of land [5, 6]. Under the conditions of the sea basin, the main factor in the distribution of sediments, the rate of their accumulation along the lateral and section, and the thickness of accumulated formations, their further epigenesis depend on the topography of the seabed and to some extent the surrounding land [8].

From the point of view of oil and gas content, the Late Proterozoic and Phanerozoic sedimentary rocks are represented by similar lithological types – sandstones and siltstones, limestones, dolomites and intermediate compositional differences. Among the carbonates in the Proterozoic, chemogenic dolomites predominated. According to N. M. Strakhov, A. B. Ronov and others,

* nadezhda.fedorova.59@inbox.ru
https://orcid.org/0000-0002-7658-1599

biogenic algal dolomites and limestones appeared in the Late Proterozoic. Later, at the beginning of the Cambrian, dolomites gradually give way to limestones, while the former are increasingly gravitating to areas of arid climate. Lime sediments develop in the areas of humid and arid climate. The proportion of biogenic differences increases with time not only on the shelf, but also in the deep sea due to the wide distribution of planktonic organisms that build their skeletons from calcium [9].

The Pre-Caspian depression is a huge area of promising lands, a wide stratigraphic range of industrial oil-and-gas potential, a favorable paleotectonic regime of long and stable subsidence, which provides generation and accumulation of hydrocarbons of different phase composition [10].

It is known that in creating a favorable environment for the accumulation and subsequent occurrence hydrocarbon compounds, the tectonic regime is of decisive importance. In this case, a long-term deflection of the sedimentation basin with the preservation of a more or less constant geochemical environment is a prerequisite [11]. Paleotectonic factors determine the direction of lithological-facies, geochemical, hydrogeological, thermobaric and other processes during the sedimentation period within the platform areas.

While studying numerous geological factors, I.M. Gubkin singled out tectonics and paleotectonics as defining factors, since the mode and direction of tectonic movements in time and space determine:

– spatial distribution of large sedimentation basins and regional uplifts, as well as changes in their lithological and facies conditions for the accumulation of sediments, and hence the conditions for the formation and distribution of oil and gas formation and oil and gas accumulation areas;

– formation of various structural forms, which, in the presence of other necessary conditions, can serve as traps for accumulations of oil and gas of a structural type;

– spatial distribution of coastlines, attenuation in the direction of uplift in strata, stratigraphic disagreement and other geological phenomena associated with the formation of oil and gas accumulations of lithological and stratigraphic types [12, 13].

Results

The results of paleotectonic reconstructions of the territory of the Astrakhan arch are aimed at exploring structures that are promising in the oil and gas bearing. The use of these studies makes it possible to more purposefully identify tectonic structural features that are promising in the oil and gas sector, and more reliably conduct comprehensive forecasts of this region.

In the southwestern part of the territory, within the Astrakhan arch during the entire Paleozoic time, the geotectonic regime was a multiple alternation of movements of different signs. All this led to the development of numerous transgressions and regressions that changed the conditions of sedimentation; coastlines often moved, breaks and disagreements arose within the island zones [14].

It is believed that in the southwestern part of the Pre-Caspian depression, including the Astrakhan arch, the orogenic stage ended in the Upper Proterozoic and the crystalline basement consolidated, as a result of which a modern structural plan of the Paleozoic deposits was formed, which inherited the relief of the basement surface. The latter was formed as a result of vertical movements of blocks in the form of horsts and downthrown block complicated by less amplitude faults. Lower relief forms of the crystalline basement are leveled by rocks from Riphean to Ordovician-Silurian [15].

It is rather difficult to restore the relief of the near-Devonian surface due to the lack of drilling data. 3D OGT-64 3D seismic data and 2D seismic data, as well as core and slime materials based on parametric well drilling data made it possible to construct paleorelief maps of the pre-Frasnian (Middle Devonian) and Pre-Famennian surfaces [16].

Paleogeomorphic analysis and the construction of paleorelief maps were performed using the thickness method [17–20]. Corrections for changes in thicknesses as a result of post-sedimentation compaction of sediments were not taken on the assumption that the lithological composition of rocks and their rather consistent area thickness allowed these corrections to be neglected, since they did not significantly affect the relief hypsometry.

Two sections are distinguished on the paleogeomorphic map of the pre-Frasnian (Middle Devonian) surface (Fig. 1): left-bank and right-bank, the border is the modern Volga-Akhtuba valley flat. The left-bank part is characterized by the development of denudation landforms. These are steep range of hills. They extend in a sub-latitudinal direction to a distance of at least 35 km, a width is 10–12 km. Relative elevation marks vary from 150 m (area of well 1 Tabakovskaya – 50 Astrakhanskaya) to 400 m (well No 2 is Volodarskaya, mark is 370 m). At the turn of the Middle and Late Devonian, a denudation type of paleorelief was formed, where the processes of erosion and removal of destruction products played a major role.

In general, in the left-bank part of the territory of the Astrakhan arch at the turn of the Middle and Late Devonian, a denudation type of paleorelief was formed, where the processes of erosion and removal of destruction products played a dominant role. The relief-forming processes are manifested here more intensively than in other areas, due to the activation of tectonic movements on the border of these two epochs of the Devonian time (middle and upper). All this territory in the Middle Devonian paleorelief, most likely, was a large watershed between the southern and northern basins confined to the Karpinsky and Zavolzhsky downwarpings, respectively [21].

The right-bank area is also characterized by the formation of predominantly denudation forms of paleorelief, where three areas of denudation and one area of accumulation are determined. Denudation areas are outlined with structural contours from 100 to 250 m and extend over a distance of 30 km with a width of about 15–20 km.

The accumulation area occupies part of the territory of the Astrakhan arch, which goes into the delta of the Volga River. The length in the latitudinal direction at a distance of about 45 km is limited to a 50-m structural contour. In the areas of reaching the paleosurface of carbonate rocks during a long break in sedimentation, karst relief forms could have formed. Penetration of the super-deep Devonskaya No 2 well of the lower Devonian bottoms confirmed the presence of a long break in sedimentation between the Middle and Upper Devonian.

The paleorelief of the Pre-Famennian surface (Fig. 2) differs sharply from the Middle Devonian. These changes affected the entire territory of the Astrakhan arch. The tectonic restructuring of ancient structural plan that took place at the turn of the Middle and Late Devonian prepared the basis for the development of the Late Devonian transgression and the accumulation of terrigenous sediments, and then, as they develop, carbonate sediments. The formation of a new pre-Famennian paleorelief took

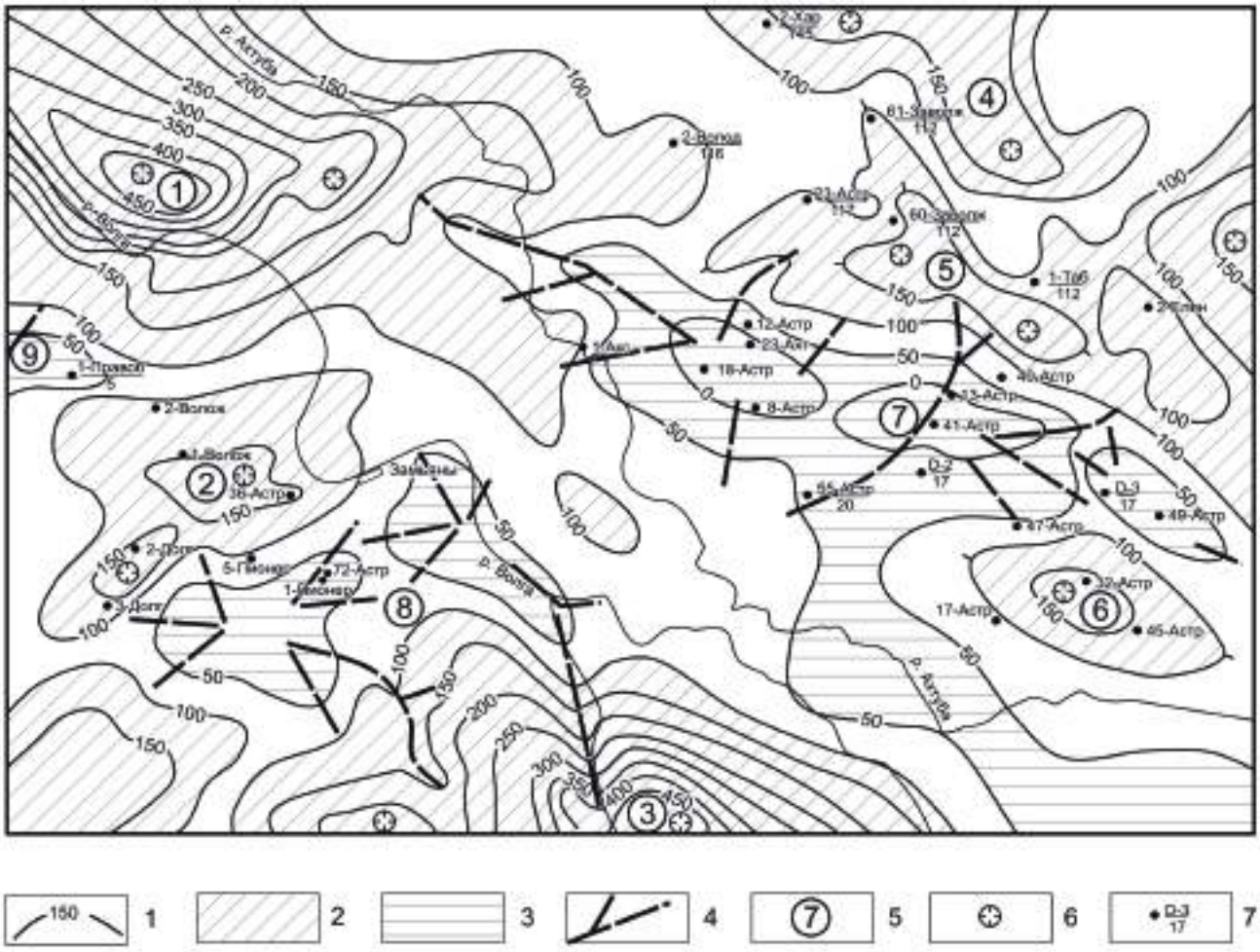


Figure 1. Paleogeomorphic map of the Pre-Frasnian (Middle Devonian) surface of the territory of the Astrakhan arch. 1 – structural contours of relative height of paleorelief, m; 2 – areas of denudation; 3 – accumulation areas; 4 – dells; 5 – numbers of areas, sites; 6 – karst land forms; 7 – wells: numerator – number of a borehole; denominator is the relative marker of palaeotopography, m.

Рисунок 1. Палеогеоморфологическая карта предфранской (среднедевонской) поверхности территории Астраханского свода. 1 – изогипсы относительного превышения палеорельефа, м; 2 – области денудации; 3 – области аккумуляции; 4 – ложбины стока; 5 – номера областей, участков; 6 – карстовые формы рельефа; 7 – скважины: числитель – номер скважины, знаменатель – относительная отметка палеорельефа, м.

place. Most of the largest land forms have an inverse genesis; in other cases, a slight shift in the emphasis of relief formation has occurred; karst forms formed in many areas [22].

In the left-bank part, the hillside elevations are outlined mainly by structural contours of 100–150 m. Two uplifts are observed, linearly elongated in a northwest direction. One of them is fixed between wells No 60 – Zavolzhskaya in the west and a line of wells No 40 – Astrakhanskaya – No 2 – Elenovskaya. The length of this uplift along the closed structural contour of 150 m is 18 km with a width of 2–7 km. The second uplift is located in the area of Elenovskaya area and is contoured by the structural contour of 100 m. Its length is about 15 km; width is 5 km.

Relief-forming erosion-denudation processes in pre-Famennian time proceeded with weak intensity, resulting in a weak compartmentalization of relief. The prevailing development under such conditions was the use of karst forms (funnels, polje, voids within the thickness of limestone). At the bottom of these forms, the fall products accumulated [21].

The area of weakly expressed denudation forms of the Pre-Famennian paleorelief is observed on the Astrakhan arch, in its right-bank part, in the area of wells No 1, 2 – Volozhkovskaya, 36 – Astrakhanskaya and No 5 – Pionerskaya. They are contoured by the structural contour of 100 m and probably represented low (up to 50 m) hills with gentle slopes. In the southern part of the territory of the Astrakhan arch, a northern fragment can be traced of a large area of development of the erosion-denudation pre-Famennian paleorelief area. Relative elevations of the relief forms reached 450 m, and the total height of the peak above the foot is 350 m. The northern slope is cleaved by a narrow dell more than 10 km long.

Such a profile of the dell, the straightness of its orientation clearly indicate the prevalence of deep bottom erosion in this place, which in turn may indicate an intense uplift of this section of the territory in Pre-Famennian period. The slopes of such large landforms can be complicated by smaller geomorphological units, such as erosion remnants.

Sites of erosion and denudation were located in the peripheral parts of the territory of the Astrakhan arch. It is as if they border the central part of the arch area from all sides, which is a vast area of accumulation of erosion material that is carried out with geomorphological features typical of such areas. The accumulation area splits into two parts: left-bank and right-bank. The largest area is the left-bank part, where ancient dells of various orientations are widely used.

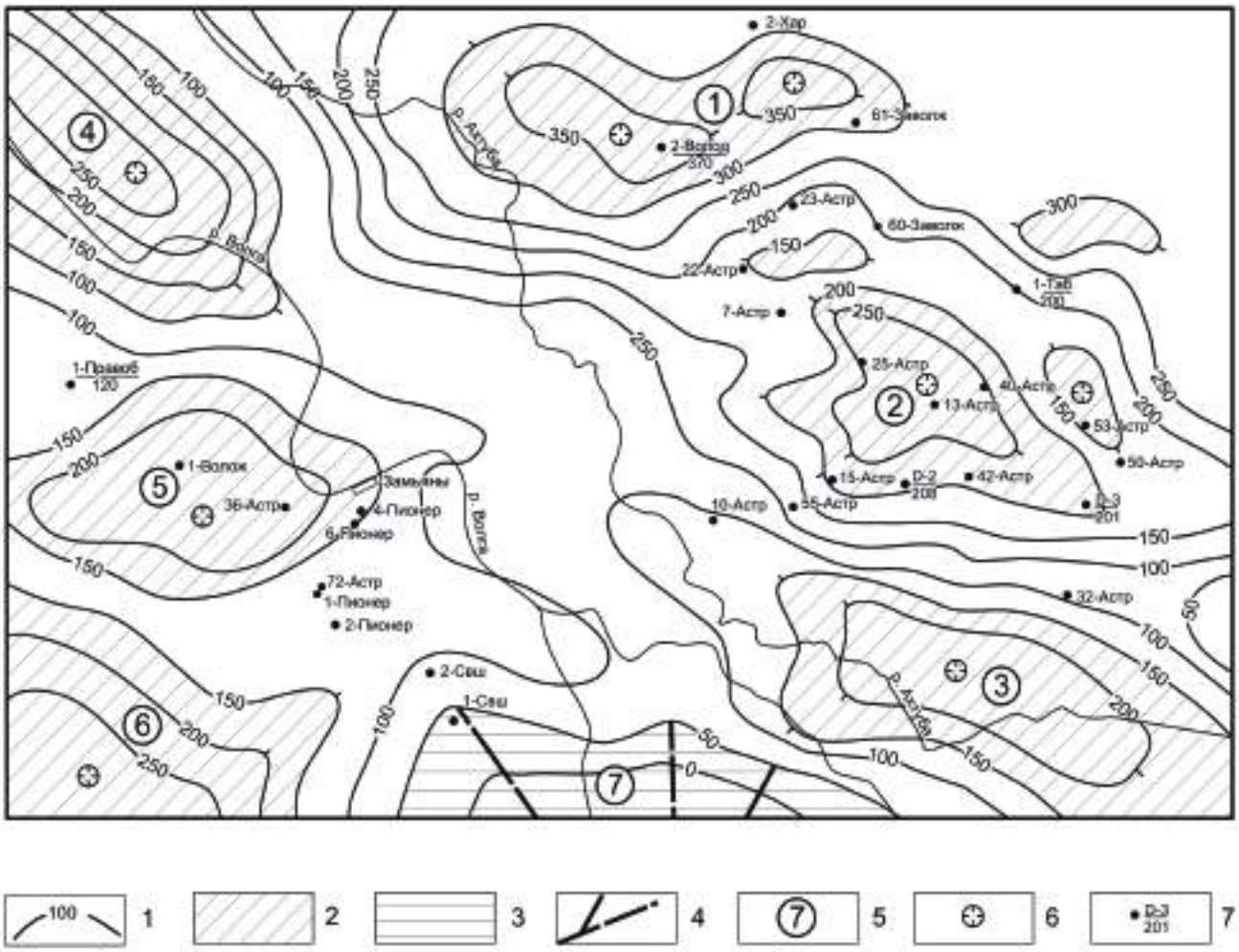


Figure 2. Paleogeomorphic scheme of the Pre-Famennian surface of the territory of the Astrakhan arch. 1 – structural contours of relative height of paleorelief, m; 2 – areas of denudation; 3 – accumulation areas; 4 – dells; 5 – numbers of areas, sites; 6 – karst land forms; 7 – wells: numerator – number of a borehole; denominator is the relative marker of palaeotopography, m.

Рисунок 2. Палеогеоморфологическая карта предфаменской поверхности территории Астраханского свода. 1 – изогипсы относительного превышения палеорельефа, м; 2 – области денудации; 3 – области аккумуляции; 4 – ложбины стока; 5 – номера областей, участков; 6 – карстовые формы рельефа; 7 – скважины: числитель – номер скважины, знаменатель – относительная отметка палеорельефа, м.

Conclusion

Having studied the geomorphological development of this territory, the authors can state:

– the Astrakhan arch area had a large caldera-shaped relief in the central part of the arch, bounded along the frontier zone by watersheds with typical relief forms of different heights and shapes;

– the intensity of relief formation in the territory was different;

– two areas of intensive territory uplift are appeared – north-western and southern with geomorphic processes, where sediments erosion prevailed over the removal of alteration products; in the places where the steep slopes of these relief forms transition into gentle slopes, proluvial processes developed and the corresponding relief was formed – alluvial cones;

– in areas where the relative elevation of the relief does not exceed 100–150 m and its forms are characterized by a smooth outline, the relief can be classified as accumulative-denudation;

– formation of karst land forms in carbonate deposits had a significant impact on the reservoir properties of rocks that make up the section of deposits (funnels, voids, cavities, etc.).

The low implementation of the forecast of the oil-and-gas potential of the Paleozoic deposits is explained by the insufficient knowledge of the conditions for the formation and placement of oil and gas deposits in these rocks and the poor development of the methods for their exploration at great depths [19].

Oil and gas deposits at shallow and medium depths on land in anticline traps are already largely explored and developed. Further replenishment of industrial hydrocarbon reserves will mainly occur due to discoveries in the water areas, in the shelf areas, and on land – in non-anticlinal type traps and at great depths. The priority of oil and gas exploration trends is currently associated with carbonate complexes of the Late Devonian-Carboniferous age, not only in the southwestern part of the Pre-Caspian depression, but also in the northern water area of the Caspian Sea and adjacent lands and can be considered as the main objects of exploration for the coming years [23]. The development of deep subsurface resources in order to produce hydrocarbons is becoming an increasingly urgent global problem.

REFERENCES

1. Vassoevich N. B. 1972, *Neftegazonosnyye osadochnyye basseyny* [Oil-and-gas bearing sedimentary basins]. Moscow, 275 p.
2. Ilyin A. F., Shchuchkina V. P., Grigorov V. A. 1987, Paleogeomorphic factors for the formation of reservoir rocks of the Astrakhan gas-condensate field. *Geomorfologiya* [Geomorphology], no. 1, pp. 35–38. (*In Russ.*)
3. Strakhov N. M. 1960, *Osnovy teorii litogeneza* [Fundamentals of the theory of lithogenesis]. Moscow, vol. 1, 212 p.; vol. 2, 574 p.; 1962, vol. 3, 550 p.
4. Levorsen A. I. 1970, *Geologiya nefti i gaza* [Geology of oil and gas]. Moscow, 627 p.
5. Harris N. B., McMillan J. M., Knapp L. J., Mastalerz M. 2018, Organic matter accumulation in the Upper Devonian Duvernay Formation, Western Canada Sedimentary Basin, from sequence stratigraphic analysis and geochemical proxies. *Sedimentary Geology*, vol. 376, issue 15, pp. 185–203. https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2018.09.004
6. Dong T., Harris N. B., Ayranci K. 2018, Relative sea-level cycles and organic matter accumulation in shales of the Middle and Upper Devonian Horn River Group, northeastern British Columbia, Canada: Insights into sediment flux, redox conditions, and bioproductivity. *Geological Society of America Bulletin*, vol. 130, issue 5-6, pp. 859–880. https://doi.org/10.1130/B31851.1
7. Hupp B. N., Weislogel A. L. 2018, Geochemical Insights Into Provenance of the Middle Devonian Hamilton Group of the Central Appalachian Basin, *U.S.A. Journal of Sedimentary Research*, vol. 88, issue 10, pp. 1153–1165. https://doi.org/10.2110/jsr.2018.62
8. Rukhin L. B. 1969, *Osnovy litologii* [Fundamentals of lithology], 704 p.
9. Proshlyakov B. K., Galyanova T. I., Pimenov Yu. G. 1987, *Kollektorskiye svoystva osadochnykh porod na bol'shikh glubinakh* [Reservoir properties of sedimentary rocks at great depths]. Moscow, 200 p.
10. Voronin N. I. 2004, *Osobennosti geologicheskogo stroyeniya i neftegazonosnost' yugo-zapadnoy chasti Prikaspiyskoy vpadiny* [Features of the geological structure and oil and gas potential of the southwestern part of the Caspian basin]. Astrakhan, 163 p.
11. Voronin N. I. 1999, *Paleontologicheskiye kriterii prognoza i poiska zalezhey nefti i gaza* [Paleontological criteria for forecasting and searching for oil and gas deposits]. Moscow, 288 p.
12. Bakirov A. A. 1982, *Geologiya i geokhimiya nefti i gaza* [Geology and geochemistry of oil and gas]. Moscow, 287 p.
13. Gubkin I. M. 1975, *Ucheniye o nefti* [Doctrine of oil]. Moscow, 385 p.
14. Tyurin A. M. 2002, To questions of the structure and formation of the Orenburg swell. *Otechestvennaya Geologiya* [Russian geology], no. 1, pp. 29–34. (*In Russ.*)
15. Brodsky A. Ya., Grigorov V. A. 1997, A new direction in the search for hydrocarbon deposits in the Astrakhan arch. *Gazovaya promyshlennost'* [Gas Industry], no. 9, pp. 25–28. (*In Russ.*)
16. Petersil'e V. I., Fortunatova N. K., Dakhnova M. V. 1998, *Kompleksnoye issledovaniye kerna skvazhiny Volodarskaya № 2* [Comprehensive core study of the Volodarskaya No 2 well]. Moscow, 81 p.
17. Grigorov V. A., Ivanov G. N. 1981, *Paleogeomorfologicheskiye predposylki poiskov stratigraficheskikh i litologicheskikh lovushek nefti i gaza v sredneyurskom produktivnom komplekse Severo-Zapadnogo Prikaspiya* [Paleogeomorphologic factors for the search for stratigraphic and lithological oil and gas traps in the Middle Jurassic productive complex of the Northwest Caspian]. VNIIEgazprom, no. 1, pp. 1–7.
18. Markovsky N. I. 1965, *Paleogeograficheskiye usloviya razmeshcheniya krupnykh zalezhey nefti* [Paleogeographic conditions for the placement of large oil deposits]. Moscow, 398 p.
19. Pronicheva M. V. 1973, *Paleogeomorfologiya v neftyanoy geologii* [Paleogeomorphology in petroleum geology]. Moscow, 252 p.
20. Shchuchkina V. P. 1980, *Metodika paleogeomorfologicheskikh issledovaniy v platformennykh oblastyakh (na primere Kalmykii)* [Methodology of paleogeomorphological studies in platform areas (for example, Kalmykia)]. *Geological structure and minerals of the Kalmyk ASSR*, no. 2, pp. 91–98.
21. Fedorova N. F., Bystrova I. V. 2013, Devonian and Lower Carboniferous sediments of the Caspian Depression. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 180 p.
22. Fedorova N. F. 2003, Model of the structural plan of the coal and Devonian sedimentary complexes of the Astrakhan arch. *Gazovaya promyshlennost'* [Gas Industry], no. 1, pp. 48–50. (*In Russ.*)
23. Abilkhasimov Kh. B. 2007, Spatial distribution regularities of natural reservoirs of Pre-Caspian depression. *Geologiya Nefti i Gaza* [Geology of oil and gas], no. 6, pp. 11–17.
24. Politykina M. A., Tyurin A. M. 2002, Prospects for oil and gas potential of the Riphean-Lower Devonian sediments in the south of the Orenburg region. *Geologiya nefti i gaza* [Geology of oil and gas], no. 5, pp. 20-23. (*In Russ.*)

The article was received on March 02, 2019

УДК 551.7 https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-3-27-32

Палеогеоморфологические предпосылки осадконакопления девонских отложений Прикаспийской впадины

Надежда Федоровна ФЕДОРОВА*
Астраханский государственный университет, Россия, Астрахань

Актуальность работы. Прикаспийская впадина – это широкий стратиграфический диапазон промышленной нефтегазоносности. Открытие в последние десятилетия ряда месторождений углеводородов является важным фактором, подтверждающим перспективность данной территории. Особенности осадконакопления на поверхности Земли зависят от происходящих в это время тектонических процессов. Показана актуальность применения новых методов исследования с целью открытия месторождений углеводородов, в частности палеогеоморфологического. Изучение палеогеоморфологических предпосылок осадконакопления в девонских отложениях и с учетом региональных особенностей палеотектонического развития позволяют на научном уровне обосновать перспективы нефтегазоносности данной территории. В связи с этим необходимо развивать и выявлять диалектическое единство между палеогеоморфологией, палеотектоникой и осадконакоплением, что позволит определить закономерности формирования и размещения месторождений нефти и газа.
Целью исследования является научное обоснование перспектив нефтегазоносности и повышения прогноза девонского комплекса отложений Прикаспийской впадины с учетом влияния палеотектонического и палеогеоморфологического факторов.
Методология изучения основана на выявлении роли палеотектонического метода при определении нефтегазоносности данного района при благоприятном сочетании литолого-фациальных, геохимических, гидрогеологических и термобарических условий.
Результаты. Автором проводились палеогеоморфологические исследования закономерностей и условий осадконакопления в пределах Астраханского свода. Было установлено, что в течение всего палеозойского времени геотектонический режим представлял собой многократное чередование движений, различных по знаку. Также было выявлено, что многочисленные трансгрессии и регрессии меняли условия осадконакопления. На территории происходило частое перемещение береговых линий, возникали перерывы и несогласия в пределах островных зон. В результате проведенных работ было установлено, что современный структурный план палеозойских отложений унаследовал рельеф поверхности фундамента. При изучении данного вопроса были использованы материалы трехмерной сейсморазведки 3Д ОГТ-64 и площадной сейсморазведки 2Д, а также керновый и шламовый материалы по данным бурения параметрических скважин.
Выводы. Данные исследования территории Астраханского свода на основе палеогеоморфологического анализа и использование результатов геофизических и геологических материалов на стадии выявления и подготовки объектов под поисково-разведочное бурение позволяют изучить процессы формирования ловушек и пород-коллекторов и оценить перспективы нефтегазоносности данной территории на ближайшее будущее.

Ключевые слова: Прикаспийская впадина, Астраханский свод, палеотектоника. палеогеоморфология, осадконакопление, девонские отложения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вассоевич Н. Б. Нефтегазоносные осадочные бассейны. М.: Недра, 1972. С. 275.
2. Ильин А. Ф., Щучкина В. П., Григоров В. А. Палеогеоморфологические предпосылки формирования пород-коллекторов Астраханского газоконденсатного месторождения // Геоморфология. 1987. № 1. С. 35–38.
3. Страхов Н. М. Основы теории литогенеза. М.: Изд-во АН СССР, 1960. Т. 1. 212 с.; 1960. Т. 2. 574 с.; 1962. Т. 3. 550 с.
4. Леворсен А. И. Геология нефти и газа. М.: Мир, 1970. 627 с.
5. Harris N. B., McMillan J. M., Knapp L. J., Mastalerz M. Organic matter accumulation in the Upper Devonian Duvernay Formation, Western Canada Sedimentary Basin, from sequence stratigraphic analysis and geochemical proxies // Sedimentary Geology. 2018. Vol. 376, issue 15. P. 185–203. https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2018.09.004
6. Dong T., Harris N. B., Ayranci K. Relative sea-level cycles and organic matter accumulation in shales of the Middle and Upper Devonian Horn River Group, northeastern British Columbia, Canada: Insights into sediment flux, redox conditions, and bioproductivity // Geological Society of America Bulletin. 2018. Vol. 130, issue 5-6, P. 859–880. https://doi.org/10.1130/B31851.1
7. Hupp B. N., Weislogel A. L. Geochemical Insights Into Provenance of the Middle Devonian Hamilton Group of the Central Appalachian Basin, U.S.A. // Journal of Sedimentary Research. 2018. Vol. 88, issue 10. P. 1153–1165. https://doi.org/10.2110/jsr.2018.62
8. Рухин Л. Б. Основы литологии. Л.: Недра, 1969. 704 с.
9. Прошляков Б. К., Гальянова Т. И., Пименов Ю. Г. Коллекторские свойства осадочных пород на больших глубинах. М.: Недра, 1987. 200 с.
10. Воронин Н. И. Особенности геологического строения и нефтегазоносность юго-западной части Прикаспийской впадины. Астрахань: Изд-во АГТУ, 2004. 163 с.
11. Воронин Н. И. Палеонтологические критерии прогноза и поиска залежей нефти и газа. М.: ЗАО «Геоинформмарк», 1999. 288 с.
12. Бакиров А. А. Геология и геохимия нефти и газа. М.: Недра, 1982. 287 с.
13. Губкин И. М. Учение о нефти. М.: Наука, 1975. 385 с.
14. Тюрин А. М. К вопросам строения и формирования Оренбургского вала // Отечественная геология. 2002. № 1. С. 29–34.
15. Бродский А. Я., Григоров В. А. Новое направление поиска залежей углеводородов на Астраханском своде // Газовая промышленность. 1997. № 9. С. 25–28.
16. Петерсилье В. И., Фортунатова Н. К., Дахнова М. В. Комплексное исследование керна скважины Володарская № 2. М.: ВНИГНИ, 1998. 81 с.
17. Григоров В. А., Иванов Г. Н. Палеогеоморфологические предпосылки поисков стратиграфических и литологических ловушек нефти и газа в среднеюрском продуктивном комплексе Северо-Западного Прикаспия // Реф. инф. ВНИИЭгазпрома. 1981. № 1. С. 1–7.
18. Марковский Н. И. Палеогеографические условия размещения крупных залежей нефти. М.: Недра, 1965. 398 с.
19. Проничева М. В. Палеогеоморфология в нефтяной геологии. М.: Наука, 1973. 252 с.
20. Щучкина В. П. Методика палеогеоморфологических исследований в платформенных областях (на примере Калмыкии) // Геологическое строение и полезные ископаемые Калмыцкой АССР. 1980. № 2. С. 91–98.
21. Федорова Н. Ф., Быстрова И. В. Девонские и нижнекаменноугольные отложения Прикаспийской впадины. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. 180 с.
22. Федорова Н. Ф. Модель структурного плана каменноугольного и девонского комплексов отложений Астраханского свода // Газовая промышленность. 2003. № 1. С. 48–50.
23. Abilkhasimov Kh. B. Spatial distribution regularities of natural reservoirs of Pre-Caspian depression // Geologiya Nefti i Gaza. 2007. № 6. P. 11–17.
24. Политыкина М. А., Тюрин А. М. Перспективы нефтегазоносности рифей-нижнедевонских отложений юга Оренбургской области. // Геология нефти и газа. 2002. № 5. С. 20–23.

Статья поступила в редакцию 2 марта 2019 г.

* nadezhda.fedorova.59@inbox.ru
https://orcid.org/0000-0002-7658-1599

УДК 553.08 https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-3-33-38

Polychromic tourmalines from rare-metal granite pegmatites of the Medvedevsky rare metal deposit (Middle Urals)

Roman Andreevich OBOSKALOV[1,*],
Mikhail Petrovich POPOV[1, 2,**]

[1]Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russia
[1, 2]Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia

The relevance of the work is the specification of the genesis of the Medvedevsky rare-metal tourmaline deposit. To this end, as part of the work, a comparison was made of the chemical composition and trace amounts of tourmaline with the known tourmalines of the Lipovsky deposit.
The aim of the work is to study the features of the structure and compare the chemical and trace element composition of tourmalines of the Medvedevsky deposit with tourmalines of the Lipovsky field.
Research methodology. To study the chemical composition of tourmaline from the Medvedevsky deposit, a Jeol JSM-639LV scanning electron microscope with the EDS X-max 80 attachment was used. The trace element composition was studied by the ICP–MS method using the ELAN 9000 instrument. The original description was carried out using the MBS-10 binocular microscope and the Carl Zeiss petrographic microscope.
Results The data on the structural features, chemical and trace element composition of polychromic tourmaline from the Medvedevsky rare metal deposit are given.
Conclusion. A mineralogical study was conducted and the chemical and trace element composition of polychromic tourmaline from the Medvedevsky rare metal deposit was studied. A comparison is made with the chemical composition of tourmalines from the Lipovsky deposit.

Keywords: the Urals, chemical composition of tourmaline, Medvedevsky rare metal deposit, pegmatites, Ural emerald mines.

Introduction

Russian precious and semiprecious stones are a global brand; they are associated with the word "Ural". Everyone knows that the Urals are rich in precious and semiprecious stones. However, at the moment, most of the deposits being developed in the XIX – XX centuries are flooded and there is no work with them. Occurrences of colored tourmaline are very rare, and any new occurrence is interesting to study [1]. The Medvedevsky rare metal deposit was discovered in the 1960s and was studied in detail by the Makhnevskaya exploration crew. Its area is about 5 km^2. It is located 30 km north-east of the Nizhnyaya Salda (Middle Urals) [2]. The deposit is out of use now; it is a series of grass-covered main drains and dug holes.

Geology aspects of the Medvedevsky rare metal deposit

The Medvedevsky rare metal deposit is localized in the body of the Talitsky ultrabasic massif represented by massive apoperidotite serpentinites. The observed thickness of serpentinites is about 1.5 km. The massif is elongated in the submeridional direction; it embeds in the interstratified metamorphic stratum composed of amphibole, quartz-sericitic, quartz-chlorite, chlorite-epidote, and less commonly albite schists. The metamorphic complex borders in the east on the medium-grained biotite granites of the Gaevsky massif, which is the northern extension of the Murzinsky massif [2]. In the northern part, serpentinites are bordered by albitized pegmatoid granites lying subparallel to the boundaries of the massif (Fig. 1). Metasomatic zones are observed in serpentinites; they are represented by intensive phlogopite mica. This process is especially intense around the feldspath lenses, which, as a rule, have a northeast strike. The thickness of the lenses varies widely, reaching several tens of meters in the northern part of the Talitsky massif. The lenses contain, in addition to feldspar, mica and beryl of a dark green and greenish-yellow color. The content of beryl can reach 15% of the volume of the rock [3].

Pegmatites in the deposit are represented by poorly differentiated microcline-albite and albite veins. The mineralogical and structural features of pegmatite bodies are explained by different crystallization conditions and remoteness from the parent vent. Pegmatites of the internal zones of the Gaevsky massif are close to normal in composition and structure. Pegmatites localized to exocontact, including those in serpentinites of the Talitsky massif differ from the pegmatites of the internal zones by a high content of rare-metal and rare-earth elements (niobium, tantalum, beryllium, ytterbium, lithium, etc.). The main rock-forming minerals of all types of pegmatites are microcline, oligoclase, albite, quartz, and muscovite. The bodies have a medium and coarse-grained structure, sometimes having a block-system. The endocontact parts of the veins are composed of the albite-oligoclase zone with a low thickness, intensely sericitized and often kaolinized. Frequently, the albite-oligoclase zone is completely replaced by the muscovite-quartz-albite complex. Pegmatite veins can be traced up to 600 m on the strike having mostly near east-west strike. The thickness of veins varies from 0.5 to 12 m, decreasing for feathering-out to 0.1–0.3 m [4].

To compare the chemical composition of tourmaline of the Medvedevsky deposit, the results of the chemical composition of the tourmaline from the well-known Ural polychrome tourmaline deposit were used, that is Lipovsky field, which is located in the Middle Urals, in the Rezh district of the Sverdlovsk region. It is located 35 km south-southeast of the Medvedevsky deposit. Pegmatites of the Lipovsky field are confined to a synclinal structure sandwiched between three large granite massifs – Murzinsky (from the northwest), Aduysky (from the southwest) and Sokolovsky (from the east). The syncline itself is composed of metamorphic rocks belonging to the Murzinskaya suite (presumably Proterozoic), gneisses of different composition and amphibolites [5].

Field works and primitive description

During the field works in 2016, a pegmatite vein with a thickness of 2 m was studied, from which several samples were taken (Fig. 2). The vein is located in quartz-chlorite schists and is composed of microcline-albite-muscovite-quartz aggregate. The gar-

* oboskalov@igg.uran.ru
**popovm1@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0002-0527-8234

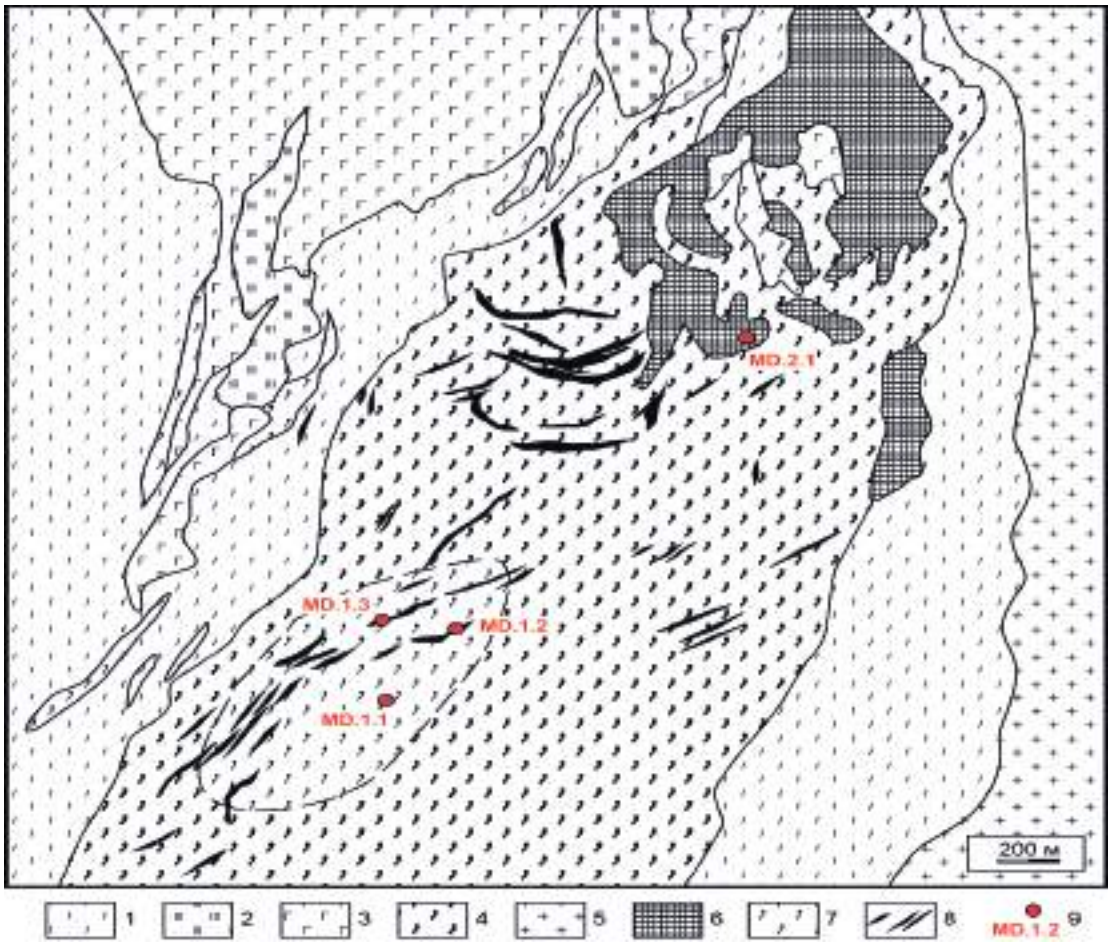


Figure 1. Geology aspects of the Medvedevsky occurrence (based on materials of the Makhnevskaya geological exploration crew of the Zauralsk expedition, 1964). 1 – amphibole schists; 2 – silica clay; 3 – amphibolized gabbro; 4 – serpentinites; 5 – biotite granites; 6 – pegmatoid granites; 7 – glimmerites; 8 – beryl-plagioclase lenses; 9 – sampling points.

Рисунок 1. Схема геологического строения проявления Медведевское (по материалам Махневской геологоразведочной партии Зауральской экспедиции, 1964 г.). 1 – амфиболовые сланцы; 2 – опоки; 3 – амфиболизированное габбро; 4 – серпентиниты; 5 – биотитовые граниты; 6 – пегматоидные граниты; 7 – слюдиты; 8 – берилл-плагиоклазовые линзы; 9 – точки отбора проб.

net crystals ranging from 0.1 to 2 mm in feldspar and light mica, presumably lepidolite, are noted in the vein in the form of large scales ranging in size from 0.5 to 2.5 cm.

When studying samples of microcline-plagioclase pegmatite, we have found two types of tourmaline crystals. *The first type* is found inside the plagioclase. It is represented by fissured prismatic crystals from 1 to 5 mm along the long axis and rarely radiated aggregates up to 4–5 mm. Color is black; sometimes brown in thin shears. *The second type* is found in small vugs and "blowing holes" of plagioclase and is represented by crystals up to 5 mm along the long axis and 2 mm in cross-section. The color varies from dark brown to light pink. In crystals, transverse zonation is often observed: the center is brownish-violet, the edges are grayish-pink (Fig. 3).

Methods of studying the characteristics of the composition of polychrome tourmaline

To study zonation of tourmaline, polished thin sections were made with the orientation of thin rock section along with the elongation of the crystal. When studying the zoned tourmaline of the second generation in thin sections, multiple cracks and deformation disturbances inside the crystals were found. In many places (outside the crystals and inside near the cracks), tourmaline is replaced by muscovite; that indicates overlapped secondary changes after the crystallization of the mineral (Fig. 4, 5). Relations (contacts) with plagioclase and microcline are uneven.

Methods of studying the chemical and trace element composition of tourmaline

To study the chemical composition of the previously obtained polished thin sections were used. The composition of the zoned tourmaline (mainly transverse zonation) was studied using the Jeol JSM-639LV scanning electron microscope with the EDS X-max 80 attachment (operator is I. A. Gottman, Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of RAS), the results are shown in Table 1. To study the trace element composition, a quantity of tourmaline crystals weighed for analysis was ground down into dust and analyzed using the ELAN-9000 instrument. The results are shown in Table 2.

According to the analysis, it can be concluded that the central zone of the crystal of the zoned tourmaline from the Medvedevsky deposit is enriched with magnesium, iron (common iron), sodium, titanium, the edge part is more enriched with calcium. In this case, a gradual increase from the edge to the center was revealed in case of iron; and calcium decreases in the reverse order. The lack of amount is due to the inability to measure light elements.

Figure 2. Pegmatitic vein stripping at the Medvedevsky deposit.
Рисунок 2. Зачистка пегматитовой жилы на Медведевском месторождении.

Figure 3. Zoned tourmaline of the second generation.
Рисунок 3. Зональный турмалин второй генерации.

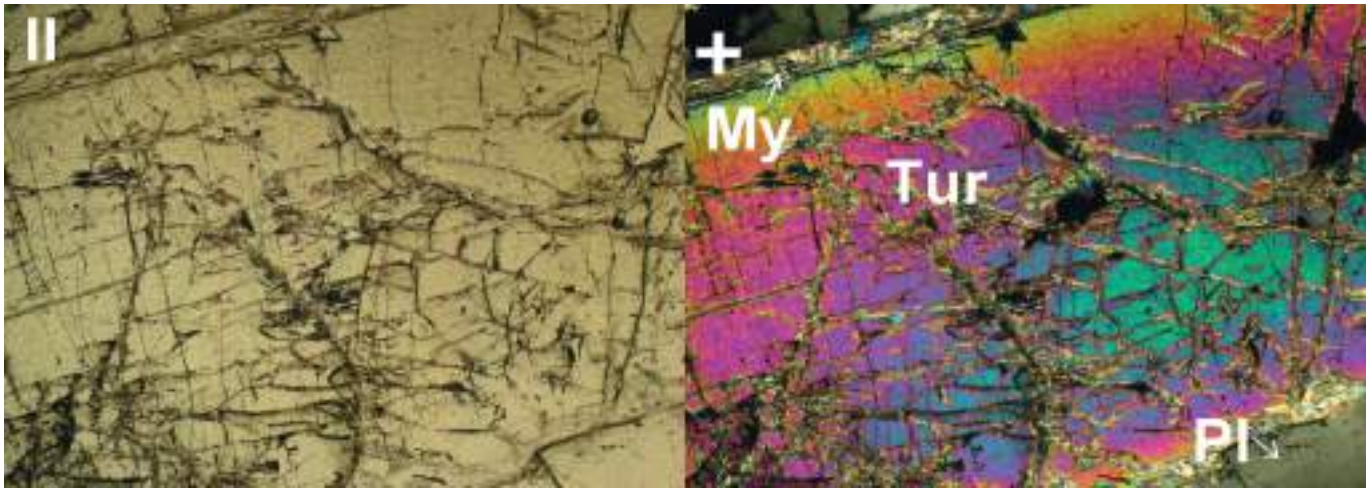


Figure 4. The internal structure of the zoned tourmaline crystal (Tur – tourmaline, My – muscovite, Pl – plagioclase).
Рисунок 4. Внутреннее строение кристалла зонального турмалина (Tur – турмалин, My – мусковит, Pl – плагиоклаз).

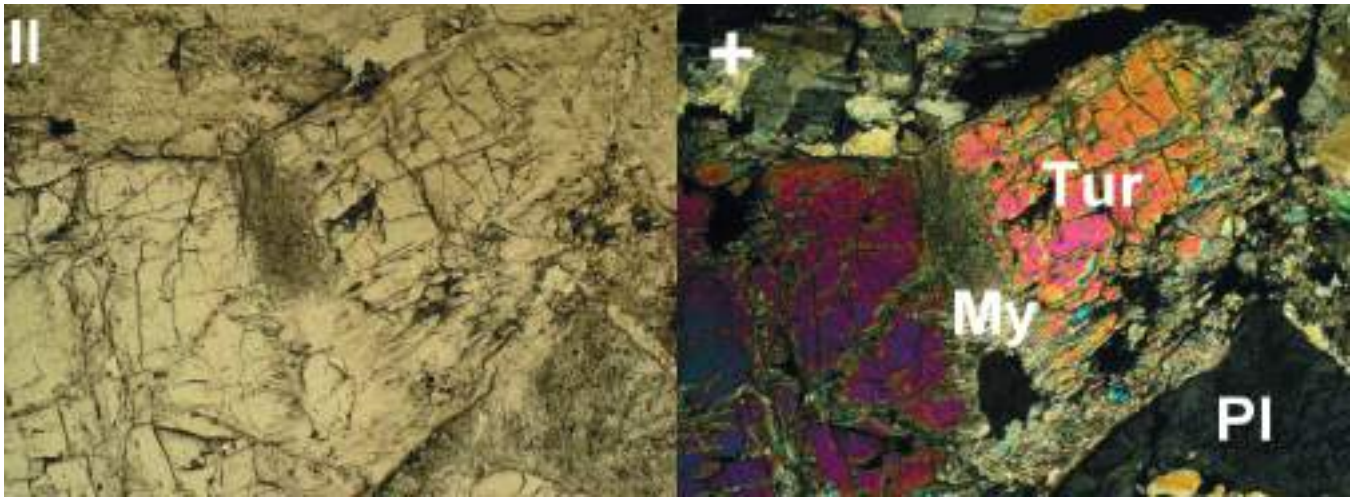


Figure 5. Secondary changes in cracks in tourmaline (Tur – tourmaline, My – muscovite, Pl – plagioclase).
Рисунок 5. Вторичные изменения по трещинам в турмалине (Tur – турмалин, My – мусковит, Pl – плагиоклаз).

Table 1. The composition of tourmaline from pegmatites of the Medvedevsky and Lipovsky deposits.
Таблица 1. Состав турмалина из пегматитов Медведевского и Липовского месторождений.

Point number	The composition of tourmaline													Amount
	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Cr_2O_3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	Li_2O	F	$O{\equiv}F_2$	
Medvedevsky deposit*														
Edge	31.70	0.23	36.71	–	0.56	3.12	–	0.74	1.80	–	2.37	–	–	77.23
Center	33.33	0.39	37.83	–	4.23	3.63	0.41	0.34	2.11	–	2.15	–	–	84.42
Edge	34.18	0.25	39.43	–	0.71	4.57	–	0.53	2.04	–	2.40	–	–	84.11
Point number	The composition of tourmaline													Amount
	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Cr_2O_3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	Li_2O	F	$O{\equiv}F_2$	
*Lipovsky field [5]***														
Edge	39.01	–	40.05	–	0.59	1.76	–	0.60	2.17	0.01	1.46	1.20	–0,51	86.34
Center	38.96	0.04	41.24	0.01	0.10	0.61	–	0.54	2.16	0.01	1.51	1.66	–0,70	86.14
Edge	38.88	–	40.04	–	0.45	1.90	–	0.63	2.13	0.01	1.46	1.20	–0,51	86.19

*The contents of B_2O_3 and H_2O are given according to the theoretical content; the content of Li_2O is calculated according to the crystal-chemical formula.
**The analysis was carried out by the Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of RAS, using Cameca SX 100 microanalyzer; the analyst is V. V. Khiller; *lithium was determined by ICP-MS [5].

Table 2. The trace element composition of tourmaline from the Medvedevsky and Lipovsky deposits, ppm [5].
Таблица 2. Микроэлементный состав турмалина с Медведевского и Липовского месторождений, г/т [5].

Elements	Deposit		Elements	Deposit	
	Medvedevsky	Lipovskoye		Medvedevsky	Lipovskoye
Li	1355.12	6775.60	La	0.07	0.20
Be	30.11	42.71	Ce	0.24	0.44
Na	0.00	16 710.00	Pr	0.03	0.07
Sc	18.75	0.54	Nd	0.11	0.32
Ti	1656.42	245.42	Sm	0.05	0.10
V	1.95	1.79	Eu	0.01	0.01
Cr	9.28	3.48	Gd	0.07	0.10
Mn	16 977.09	3892.50	Tb	0.02	0.02
Co	1.96	0.49	Dy	0.14	0.11
Ni	9.61	4.30	Ho	0.03	0.02
Cu	14.22	22.33	Er	0.10	0.08
Zn	390.61	82.43	Tm	0.02	0.01
Ga	322.57	228.90	Yb	0.16	0.07
Ge	5.29	9.56	Lu	0.03	0.01
Rb	181.49	17.17	Hf	5.63	0.30
Sr	1.22	21.69	Ta	110.66	2.01
Y	0.63	0.41	W	5.43	0.43
Zr	24.59	9.66	Tl	1.57	0.18
Nb	76.02	1.13	Pb	30.21	149.26
Mo	1.80	0.10	Bi	41.17	386.32
Ag	4.06	0.28	Th	0.29	0.26
Cd	0.17	0.58	U	9.99	0.68
Sn	57.10	6.17	Cs	35.98	12.72
Sb	1.72	29.95	Ba	10.30	39.73

Discussion of results

We can see from Table 1 that the tourmalines of the Medvedevsky deposit are distinguished by a high content of titanium, iron, and manganese. Tourmalines of the Lipovsky deposit are characterized by high concentration of potassium, fluorine. There is a general trend of increasing the content of titanium, aluminum, iron, lithium from the edge to the center and a decrease in calcium in the same direction. The main difference between tourmalines of the Medvedevsky field from similar tourmalines of

the Lipovsky field is a high content of manganese and titanium, as well as the complete absence of fluoride in their composition. According to the results of earlier studies, tourmalines of the Lipovsky field belong to fluorine-elbaite one[5–7, 8, 9].

High values of manganese, except for tourmalines of the Medvedevsky deposit, are described in samples from Austria, Zambia, the Czech Republic, Brazil, Tanzania [10–14].

We can see from Table 2 that tourmalines of the Medvedevsky deposit contain high concentration of such elements as zirconium, tantalum, niobium, tungsten, algam, manganese, uranium, and rubidium. This may indicate a rare metal (Ta – Nb) field specialization. Tourmalines of similar composition are described in Madagascar [15].

Conclusion

1. The first detailed mineralogical description of polychromic tourmaline Medvedevsky rare metal deposits (Middle Urals) is given in this paper.

2. Polychromic tourmalines of the Medvedevsky deposit have significant differences from famous Ural tourmalines of the Lipovsky field, both in chemical and trace element composition.

3. The predominance of heavier rare-metal elements in the composition of the tourmaline at the Medvedevsky deposit and the presence of mica replacing tourmaline indicates late overlapped metasomatic processes and more complex formation conditions.

4. The increased content of titanium and manganese, low lithium content and the complete absence of fluorine in the tourmalines of the Medvedevsky deposit relative to the tourmalines of the Lipovsky field indicate a different genesis of the mineral from these places.

The work was performed within the framework of the state assignment of the Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, No. AAAA-A18-118052590032-6.

REFERENCES

1. Emlin E. F., Vakhrusheva N. V., Kainov V. I. 2002, *Samotsvetnaya polosa Urala: Rezhevskoy gosudarstvennyy prirodno-mineralogicheskiy zakaznik* [Russian precious and semiprecious stones: Rezh state natural mineralogical forest reserve]: guide. Ekaterinburg, Rezh, 156 p.
2. 1961, Geological report on the results of the work of the Makhnevskaya geological exploration crew in 1958–1960 for rare metals within the Medvedevsky deposit in the Saldinsky region of the Sverdlovsk region/Uralgeolkom (it is not confidentially).
3. Bidniy A. S. 2012, *Mineralogiya, vozrast i genezis proyavleniy berilla Ural'skoy izumrudonosnoy polosy* [Mineralogy, age and genesis of occurrences of beryl in the Ural emerald-bearing belt]: PhD thesis, Moscow, 275 p.
4. Galtsin Yu. P. Exploration works for an emerald within the Nizhne-Saldinsky and Shilovo-Konevskaya areas: report of the Central crew for 1995–2000.
5. Erokhin Yu. V., Zakharov A. V. 2011, *Polikhromnyye turmaliny i lepidolit iz redkometall'nykh granitnykh pegmatitov Lipovskogo zhil'nogo polya (Sredniy Ural)* [Polychromic tourmaline and lepidolite from rare-metal granite pegmatites of the Lipovsky vein field (Middle Urals)]. Yearbook-2010: proceedings of the Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, issue 158, pp. 135–139.
6. Memetova L. R., Pekov I. V., Bryzgalov I. A. 2005, The chemical composition and zonality of tourmaline in rare-metal-semi-precious pegmatites of Lipovka, Middle Ural. Mineralogical museums: proceedings of the V international simposium. Saint-Petersburg, pp. 151–153.
7. Serdyuchenko D. P., Bolshakova T. N., Cherepovskaya G. E. 1984, Tourmalines from pegmatites and granites of the Lipovka in the Urals. *Zapiski RMO* [Proceedings of the Russian Mineralogical Society], p.113, issue 4, pp. 478–485. (*In Russ.*)
8. Hawthorne F. C., Henry D. J. 1999, Classification of the minerals of the tourmaline group. *European Journal of Mineralogy*, vol. 11, no. 2, pp. 201–215.
9. Khiller V. V., Zakharov A. V. 2018, *O nakhodke ftor-el'baita v pegmatitakh Lipovskogo zhil'nogo polya (Sredniy Ural)* [About the discovery of fluorine-elbaite in the pegmatites of the Lipovsky vein field (Middle Urals)]. VII Readings in memory of Ivanov S. N., a corresponding member of the Academy of Sciences. Materials of scientific conference to mark 70th anniversary of the founding of the Ural branch of the Russian Mineralogical Society (collection of reports). Ekaterinburg, pp. 196–198.
10. Ertl A., Hughes J. M., Prowatke S., Rossman G. R., London D., Fritz E. A. 2003, Mn-rich tourmaline from Austria: structure, chemistry, optical spectra, and relations to synthetic solid solutions. *American Mineralogist*, vol. 88, no. 8-9, pp. 1369–1376. https://doi.org/10.2138/am-2003-8-921
11. Laurs B. M., Simmons W. B., George R. Rossman, Fritz E. A., Koivula J. I., Anckar B., Falster A. U. 2007, Yellow Mn-rich tourmaline from the Canary mining area, Zambia. *Gems & Gemology*, vol. 43, no. 4, pp. 314–331. https://doi.org/10.5741/GEMS.43.4.314
12. Novák M., Selway J. B., Černý P., Hawthorne F. C., Ottolini L. 1999, Tourmaline of the elbaite-dravite series from an elbaite-subtype pegmatite at Bližná, southern Bohemia, Czech Republic. *European Journal of Mineralogy*, vol. 11, number 3, pp. 557–568. https://dx.doi.org/10.1127/ejm/11/3/0557
13. Koivula J. I., Kammerling R. C. Gem News: 1990, Largest known faceted liddicoatite tourmaline reportedly found in Brazil. *Gems & Gemology*, vol. 26, no. 1, p. 108.
14. Malisa E., Muhongo S. 1990, Tectonic setting of gemstone mineralization in the Proterozoic metamorphic terrane of the Mozambique belt in Tanzania. *Precambrian Research*. vol. 46, issues 1-2, pp. 167–176. https://doi.org/10.1016/0301-9268(90)90071-W
15. Dirlam D. M., Laurs B. M., Pezzotta F., Simmons W. B. 2002, Liddicoatite tourmaline from Anjanabonoina, Madagascar. *Gems & Gemology*, vol. 38, no. 1. P. 28–53.

The article was received on May 10, 2019

УДК 553.08 https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-3-33-38

Полихромные турмалины из редкометалльных гранитных пегматитов Медведевского редкометалльного месторождения (Средний Урал)

Роман Андреевич ОБОСКАЛОВ[1,*],
Михаил Петрович ПОПОВ[1, 2,**]

[1]Институт геологии и геохимии им. А. Н. Заварицкого УрО РАН, Россия, Екатеринбург
[1, 2]Уральский государственный горный университет, Россия, Екатеринбург

Актуальностью работы является уточнение генезиса турмалинов Медведевского редкометалльного месторождения. Для этого в рамках работы было проведено сравнение химического состава и микропримесей турмалинов с уже известными турмалинами Липовского месторождения.
Целью работы является изучение особенностей строения и сравнение химического и микроэлементного состава турмалинов Медведевского месторождения с турмалинами Липовского месторождения.
Методология исследования. Для исследования химического состава турмалина из Медведевского месторождения использовался сканирующий электронный микроскоп Jeol JSM-639LV с приставкой EDS X-max 80. Микроэлементный состав изучался методом ICP–MS на приборе ELAN 9000. Первоначальное описание проводилось с помощью бинокулярного микроскопа МБС-10 и петрографического микроскопа Carl Zeiss.
Результаты. Приведены данные по особенностям строения, химическому и микроэлементному составу полихромного турмалина с Медведевского редкометалльного месторождения.
Выводы. Проведено минералогическое исследование и изучен химический и микроэлементный состав полихромного турмалина с Медведевского редкометалльного месторождения. Проведено сравнение с химическим составом турмалинов из Липовского месторождения.

Ключевые слова: Урал, химический состав турмалина, Медведевское редкометалльное месторождение, пегматиты, Уральские изумрудные копи.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИГГ УрО РАН, № гос. рег. АААА-А18-118052590032-6.

ЛИТЕРАТУРА

1. Емлин Э. Ф., Вахрушева Н. В., Кайнов В. И. Самоцветная полоса Урала: Режевской государственный природно-минералогический заказник: путеводитель. Екатеринбург; Реж: УГГГА, 2002. 156 с.
2. Геологический отчет о результатах работ Махневской геологоразведочной партии в 1958–1960 годах на редкие металлы в пределах Медведевского месторождения в Салдинском районе Свердловской области / Уралгеолком. 1961 (не секретно).
3. Бидный А. С. Минералогия, возраст и генезис проявлений берилла Уральской изумрудоносной полосы: автореф. дис. … канд. геол.-минерал. наук. М., 2012. 275 с.
4. Гальцин Ю. П. Поисковые работы на изумруд в пределах Нижне-Салдинской и Шилово-Коневской площадей: отчет Центральной партии за 1995–2000 гг.
5. Ерохин Ю. В., Захаров А. В. Полихромные турмалины и лепидолит из редкометалльных гранитных пегматитов Липовского жильного поля (Средний Урал) // Ежегодник-2010: труды ИГГ УрО РАН. 2011. Вып. 158. С. 135–139.
6. Меметова Л. Р., Пеков И. В., Брызгалов И. А. Химический состав и зональность турмалинов в редкометалльно-самоцветных пегматитах Липовки, Средний Урал // Минералогические музеи: материалы V Междунар. симпоз. СПб.: СПбГУ, 2005. С. 151–153.
7. Сердюченко Д. П., Большакова Т. Н., Черепивская Г. Е. Турмалины из пегматитов и гранитов Липовки на Урале // Записки ВМО. 1984. Ч. 113, вып. 4. С. 478–485.
8. Hawthorne F. C., Henry D. J. Classification of the minerals of the tourmaline group // European Journal of Mineralogy. 1999. Vol. 11, № 2. P. 201–215.
9. Хиллер В. В., Захаров А. В. О находке фтор-эльбаита в пегматитах Липовского жильного поля (Средний Урал) // VII Чтения памяти чл.-корр. РАН С. Н. Иванова: материалы Всерос. науч. конф., посвящ. 70-летию основания Уральского отделения Российского минералогического общества (сборник докладов). Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2018. С. 196–198.
10. Ertl A., Hughes J. M., Prowatke S., Rossman G. R., London D., Fritz E. A. Mn-rich tourmaline from Austria: structure, chemistry, optical spectra, and relations to synthetic solid solutions // American Mineralogist. 2003. Vol. 88, № 8-9. P. 1369–1376. https://doi.org/10.2138/am-2003-8-921
11. Laurs B. M., Simmons W. B., George R. Rossman, Fritz E. A., Koivula J. I., Anckar B., Falster A. U. Yellow Mn-rich tourmaline from the Canary mining area, Zambia // Gems & Gemology. 2007. Vol. 43, № 4. P. 314–331. https://doi.org/10.5741/GEMS.43.4.314
12. Novák M., Selway J. B., Černý P., Hawthorne F. C., Ottolini L. Tourmaline of the elbaite-dravite series from an elbaite-subtype pegmatite at Bližná, southern Bohemia, Czech Republic // European Journal of Mineralogy, 1999. Vol. 11, number 3. P. 557–568. https://dx.doi.org/10.1127/ejm/11/3/0557
13. Koivula J. I., Kammerling R. C. Gem News: Largest known faceted liddicoatite tourmaline reportedly found in Brazil // Gems & Gemology. 1990. Vol. 26, № 1. P. 108.
14. Malisa E., Muhongo S. Tectonic setting of gemstone mineralization in the Proterozoic metamorphic terrane of the Mozambique belt in Tanzania // Precambrian Research. 1990. Vol. 46, issues 1-2. P. 167–176. https://doi.org/10.1016/0301-9268(90)90071-W
15. Dirlam D. M., Laurs B. M., Pezzotta F., Simmons W. B. Liddicoatite tourmaline from Anjanabonoina, Madagascar // Gems & Gemology. 2002. Vol. 38, № 1. P. 28–53.

Статья принята в редакцию 10 мая 2019 г.

* oboskalov@igg.uran.ru
**popovm1@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0002-0527-8234

УДК 622.337.2(07) https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-3-39-45

Физико-химическая характеристика горючих сланцев месторождений Джангичай, Большой и Малый Сияки (Республика Азербайджан)

Кейкавус Юсифович АДЖАМОВ*,
Сакит Рауф оглы РАСУЛОВ**,
Эльвира Анверовна ГУСЕЙНОВА***,
Сабина Музаяддин кызы ГАСАНОВА****

Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности, Республика Азербайджан, Баку

Актуальность. Горючие сланцы относятся к наиболее богатым источникам химического сырья, так как представляют собой сложный органоминеральный комплекс: высокое содержание в них летучих веществ при относительно малом содержании нелетучей горючей массы в остатке является основой для получения не только энергии, но и синтетических жидких топлив. Кроме значительных запасов нефти, Азербайджан обладает также и богатыми месторождениями горючих сланцев, расположенных главным образом в восточной части республики, а также у подножия Большого Кавказа. В общей сложности в Азербайджане имеются около 60 месторождений, которые особенно распространены в северо-западной части Шемахино-Гобустанского синклинория. Горючие сланцы среднего коуна Гобустана установлены на площадях Джангичай, Боян-Ата и др. Среди наиболее крупных – месторождение Джангичай. Оно расположено в 60 км западнее г. Баку на площади 8 км^2; сланценосная толща залегает в низах коуна и содержит пласты горючих сланцев мощностью до 5 м, суммарная площадь пластов горючих сланцев 11,05 км^2. Также следует отметить месторождения Большой и Малый Сияки, суммарная площадь которых составляет 22–25 км^2.

Цель работы: исследование физико-химических характеристик горючих сланцев месторождений Джангичай, Большой и Малый Сияки.

Методология исследования. В ходе исследований горючих сланцев были определены их зольность (ГОСТ 11022–95), влажность (ГОСТ 11014–2001), элементный состав (ASTM D-3178), содержание летучих (ГОСТ 6382–2001), теплота сгорания (ГОСТ 147–2013), содержание органической составляющей и минеральных компонентов.

Результаты. В ходе исследований сланцев месторождений Джангичай, Большой и Малый Сияки был установлен их элементный, минеральный и компонентный состав. Наибольшее количество органического углерода характерно для сланцев месторождения Большой Сияки. Было выявлено, что в основном химический состав исследуемых образцов сланцев представлен оксидами кремния (35,89–36,94 %), кальция (21,88–22,95 %), железа (17,34–17,62 %) и серы (13,9–18,08 %). Отмечена высокая ценность твердого остатка сланцев месторождений Большой и Малый Сияки, Джангичай как сырья для производства неорганических веществ, а также смолы – как сырья для нефтехимии. Характер углеводородного состава исследуемых сланцев позволил сделать вывод о том, что химический состав сланцев месторождений Джангичай, Большой и Малый Сияки соответствует керогенному типу II.

Выводы. Сделан вывод о том, что с учетом характера исследуемых сланцев месторождений Большой и Малый Сияки, Джангичай их использование в качестве энергетического топлива путем прямого сжигания будет неэффективным, а получение бессернистых моторных топлив из сланцевых масел возможно только после достаточно дорогого процесса сероочистки. Поэтому в качестве основного направления дальнейших исследований предлагается переработка горючих сланцев в комплексе с получением продуктов нефтехимического синтеза.

Ключевые слова: горючие сланцы, месторождения Джангичай, Большой и Малый Сияки, смола, твердый остаток, кероген.

Введение

В последние десятилетия наблюдается рост количества исследований, посвященных возможностям комплексного использования горючих сланцев как резервного источника энергетического сырья, мировые запасы которого могут в определенной мере компенсировать дефицит энергоресурсов и удовлетворить потребности нефтехимии. При сравнении характеристик твердых горючих ископаемых можно сделать вывод, что горючие сланцы относятся к наиболее богатым источникам химического сырья [1–4]. Среди всех известных твердых горючих ископаемых они занимают особое место, так как представляют собой сложный органоминеральный комплекс: высокое содержание в них летучих веществ при относительно малом содержании нелетучей горючей массы в остатке является основой для получения не только энергии, но и синтетических жидких топлив.

Несмотря на значительные запасы нефти, Азербайджан обладает также и богатыми месторождениями горючих сланцев (рис. 1), расположенных главным образом в восточной части республики, а также у подножия Большого Кавказа. В общей сложности в Азербайджане имеются около 60 месторождений, которые особенно распространены в северо-западной части Шемахино-Гобустанского синклинория, первые сведения о которых были опубликованы в работах В. В. Вебера [5]. Горючие сланцы среднего коуна Гобустана установлены на площадях Джангичай, Боян-Ата и др. [6]. Среди наиболее крупных – месторождение Джангичай. Оно расположено в 60 км западнее г. Баку на площади 8 км^2; сланценосная толща залегает в низах коуна и содержит пласты горючих сланцев мощностью до 5 м, суммарная площадь пластов горючих сланцев 11,05 км^2 [1, 5]. Также следует отметить месторождения Большой и Малый Сияки, суммарная площадь которых составляет 22–25 км^2.

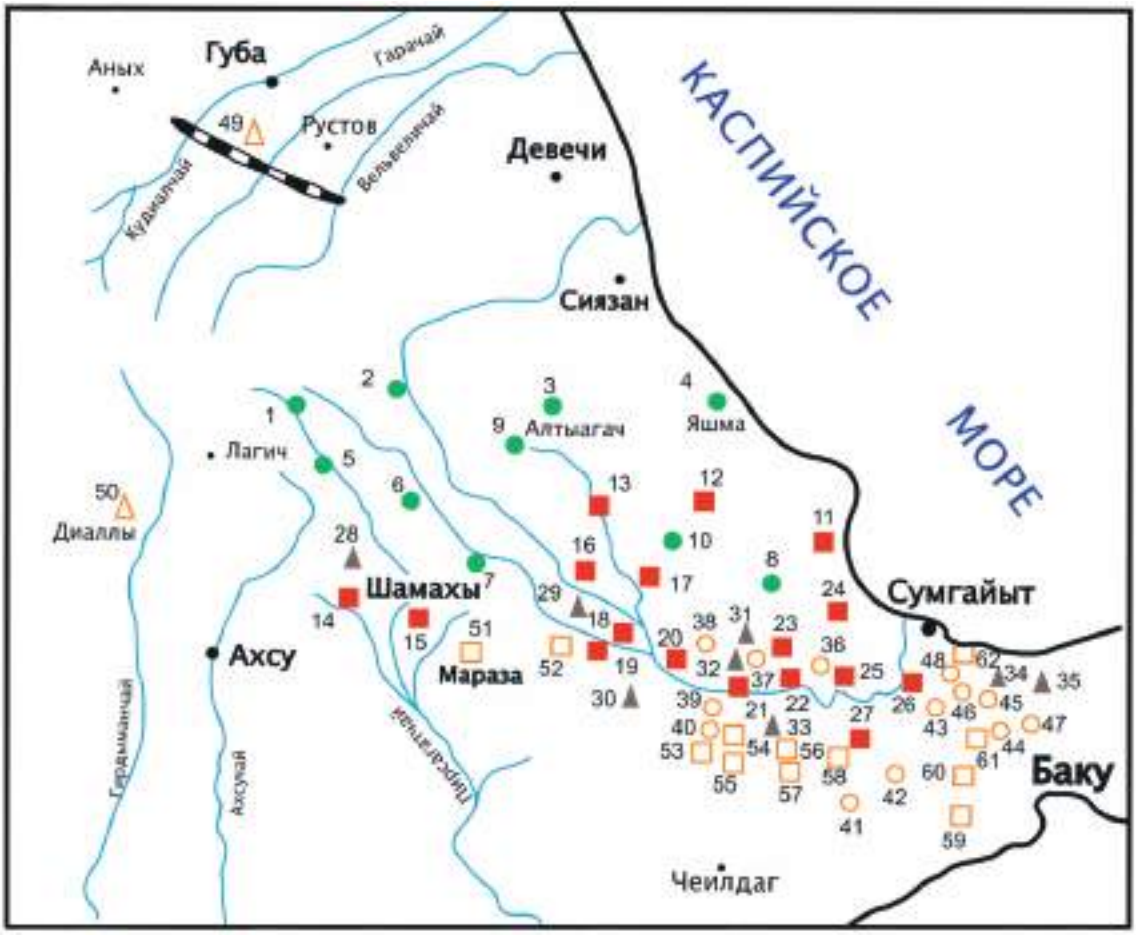
Сланцы Большого и Малого Сияки, а также Джангичая обладают сланцеобразной текстурой и различным минеральным составом. В рамках данной работы представлены сравнительные результаты исследований физико-химической характеристики горючих сланцев этих месторождений.

Методика эксперимента

В ходе исследований горючих сланцев были определены их зольность (ГОСТ 11022–95), влажность (ГОСТ 11014–2001), элементный состав (ASTM D-3178), содержание летучих (ГОСТ 6382–2001), теплота сгорания (ГОСТ 147–2013).

Как и все виды твердого топлива, горючие сланцы состоят из двух частей – органических веществ и минеральных компонентов. В данной работе для определения потенциального содержания смол в горючих сланцах использовал-

* ✉ adjamovkeykavus@gmail.com
** rasulovsakit@gmail.com
https://orcid.orq/0000-0002-1548-3143
***elvira_huseynova@mail.ru
https://orcid.org/0000-0003-0297-1516
****sabuna75@mail.ru



Верхний мел. 1 – Зарат-Хейбери; 2 – Сарыдашчай; 3 – Башыхлы; 4 – Заратская синклиналь; 5 – Талышнури; 6 – Астраханка; 7 – Хильмилли (верхний майкоп); 8 – Куркачидаг (верхний майкоп); **Нижний мел**. 9 – Алтыагач; 10 – Кемишдаг (верхний майкоп)

Средний коун. 11 – Яшма (меотис); 12 – Чаркишлак; 13 – Амбизляр; 14 – Шамахы (верхний майкоп); 15 – Арабшалбаш (верхний майкоп); 16 – Агдере (верхний майкоп); 17 – Шахандаг; 18 – Тува; 19 – Караджюзлю (верхний майкоп); 20 – Малый Сияки (верхний майкоп, конк); 21 – Джангичай; 22 – Кечалляр; 23 – Нижнекендская синклиналь; 24 – Агбурунская синклиналь; 25 – Пирикешкюль; 26 – Гейтепе (верхний майкоп, меотис); 27 – Учтепе (верхний майкоп, конк, меотис)

Верхний майкоп. 28 – Ангехаран; 29 – Герадиль; 30 – Шаибляр; 31 – Киблядаг; 32 – Джангидаг; 33 – Бояната (меотис); 34 – Орджандаг (конк, меотис); 35 – Фатмайы (конк, меотис)

Конк. 36 – Исламдаг (меотис); 37 – Маяш (меотис); 38 – Большой Сияки (меотис); 39 – Сунгур (меотис); 40 – Байгушская (меотис); 41 – Шорбулаг (меотис); 42 – Гараэйбат (меотис); 43 – Гездек (меотис); 44 – Зигилпири; 45 – Масазыр (меотис); 46 – Качелдаг; 47 – Бинагады (меотис); 48 – Сараи (меотис)

Верхний сармат. 49 – Губинское; 50 – Диаллинское

Меотис. 51 – Джеирли; 52 – Ахудаг; 53 – Байгушты; 54 – Алакишлак; 55 – Гаракишлак; 56 – Сарыдаш; 57 – Гырдаг; 58 – Космалидаг; 59 – Аташкя; 60 – Шабандаг; 61 – Хырдалан; 62 – Джорат

Рисунок 1. Схематическая карта проявлений горючих сланцев Азербайджана. Масштаб 1 : 1000000; в скобках указан возраст отложений, с которым связано проявление горючих сланцев).
Figure 1. Scheme of occurrences of oil shales of Azerbaijan. Scale 1: 1,000,000; the age of the deposits is given in parentheses, which is associated with the occurrence of oil shale.

ся анализ Фишера. Для его проведения горючие сланцы измельчались на лабораторной мельнице, из них выбиралась фракция 0,1 мм и в течение 12 ч сушилась в токе азота при 105 °С. Анализ Фишера проводится на стандартной установке ISO 647 [7]; 50 г горючего сланца помещается в реторту и при 520 °С нагревается 80 мин. Продукты разложения собираются в приемнике. Газы, полученные при разложении, собираются в емкости и подвергаются хроматографическому анализу. Остаток определяется по разности взвешивания реторты до и после анализа.

Химический анализ газа проводился на хроматографе Hewlet-Packard (HP 6890). Для хроматографического анализа анализируемый газ подавался со скоростью 25 мл/мин. Температура в колоннах 30 °С, в детекторе и инжекторе 100 °С. В 1-й колонне

диаметром 3 мм и длиной 6 м анализируется фракция газа C_3–C_4. В этой колонне в качестве носителя применяется хромосорб-фосфор, пропитанный смесью из 80 %-ного 2-(этоксиэтил)адипината и 20 % ди(2-этилгексил)себацината. Во второй колонке выделяются CO_2 и углеводороды C_2, в третьей колонке, заполненной молекулярными ситами 5Å, выделяются CH_4 и CO.

Элементный анализ сланцев, а также образующихся смолы и остатка проводили по методике ASTM D-3178 [8]. При этом анализе определяется количество общего углерода. В минеральной основе горючих сланцев почти всегда присутствуют карбонаты, количественным определением которых можно установить содержание органического углерода в составе сланца. Количество неорганического углерода определяли следующим образом. К навеске горючего сланца добавляли 5н HCl и выдерживали на водяной бане. Выделяющийся при этом CO_2 поступал в поглотительную емкость с насыщенным раствором $Ba(OH)_2$. Количество неорганического углерода рассчитывали гравиметрическим методом, исходя из образовавшегося при этом $BaCO_3$.

Для определения химического состава керогена применялась экстракция избирательными растворителями. Для этого горючие сланцы измельчались, отбиралась фракция < 250 мкм, которая в течение 10 ч при температуре 105 °C продувалась азотом. После от нее отбиралось 250 г сланцев, которые помещали в аппарат Сокслета и при температуре, близкой к температуре кипения растворителя (200 °C), проводили экстракцию. В качестве растворителя использовался N-метилпирролидон. Экстракция проводилась до изменения цвета растворителя. После этого экстракт отфильтровывался под вакуумом. Далее экстракт обрабатывался гексаном и толуолом. В гексане растворялись мальтены, а в толуоле асфальтены.

Для того чтобы определить состав мальтенов, использовался детекторный хроматограф HP 5890, в качестве сорбента использовался метилсиликон «PONA».

Условия хроматографического анализа: газ-носитель – гелий (1 мл/мин), температура в детекторе 290 °C, в инжекторе 250°C, в термостатной печи, располагающейся в хроматографической колонке, начальная температура 25 °C, конечная температура 300 °C, скорость нагрева 5 °C/мин.

Результаты и их обсуждение

Экспериментальные результаты технического анализа образцов горючих сланцев приведены в табл. 1. Как видно из представленных данных, количество органического углерода среди исследуемых образцов возрастает в следующей последовательности:

Таблица 1. Технический анализ исследуемых сланцев.
Table 1. Technical analysis of the studied shales.

Показатели	Данные технического анализа		
	Большой Сияки	Джангичай	Малый Сияки
Органический углерод, мас. %	27,6	20,7	21,25
Плотность, кг /м^3	2223	2250	2241
Влажность, мас. %	2,72	2,84	2,76
Содержание летучих, мас. %	29,95	22,63	23,48
Зола, мас. %	74,64	71,54	71,3
Теплота сгорания, кДж/кг	10 014	9850	10 017

Таблица 2. Химический состав части сланцев.
Table 2. The chemical composition of shales.

Компоненты	Количество, мас. %		
	Большой Сияки	Джангичай	Малый Сияки
SiO_2	35,89	36,940	36,200
Fe_2O_3	17,62	17,340	17,580
CaO	21,88	22,950	22,200
MgO	1,10	0,680	1,300
K_2O	0,99	1,080	1,040
TiO_2	1,41	0,880	1,430
MnO	1,20	0,450	0,970
CuO	0,39	0,310	0,520
ZnO	0,89	0,140	0,770
SO_3	14,29	18,080	13,900
P_2O_5	1,32	1,126	1,219
Co	0,04	0,018	0,031
MoO	2,98	0,004	2,840

Таблица 3. Результаты анализа газов.
Table 3. Results of gas analysis.

Продукты	Содержание, %*		
	Большой Сияки	Джангичай	Малый Сияки
CO	0,25	0,23	0,22
CO_2	2,11	1,81	2,29
CH_4	1,92	1,46	2,03
C_2H_4	1,81	1,32	1,74
C_2H_6	1,25	1,14	1,33
C_3H_6	1,26	1,05	1,17
C_3H_8	0,91	0,59	0,67
C_4H_8	1,52	1,46	1,70
C_4H_{10}	2,65	1,83	2,47
H_2S	0,80	0,70	0,77

*Содержание приводится в массовых процентах, а состав газа – в объемных процентах.
*The content is given in wt %; gas composition – in v/v %.

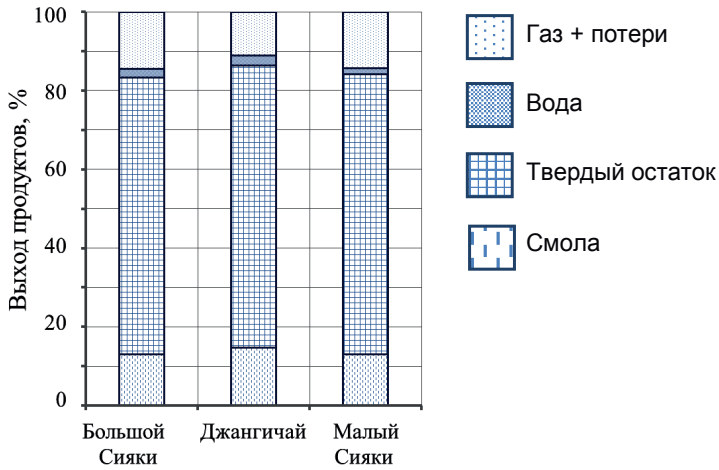


Рисунок 2. Распределение продуктов согласно результатам анализа Фишера.
Figure 2. Distribution of products according to Fisher analysis.

Таблица 4. Результаты элементного анализа исходных сланцев, смолы и твердого остатка.
Table 4. The results of elemental analysis of the initial shale, resin and solid residue.

Элементный анализ	Содержание, мас. %			
	C	H	N	S
Сланец				
Большой Сияки	29,25	3,02	0,96	1,61
Джангичай	21,93	2,56	0,92	3,24
Малый Сияки	22,51	2,60	0,92	1,59
Смола				
Большой Сияки	79,20	11,10	1,25	1,20
Джангичай	77,46	11,31	1,24	1,53
Малый Сияки	78,30	11,18	1,15	1,10
Твердый остаток				
Большой Сияки	17,10	1,20	0,87	1,10
Джангичай	17,76	1,01	0,86	1,48
Малый Сияки	17,21	1,08	0,88	1,02

Таблица 5. Состав фракций экстракта.
Table 5. The composition of the fractions of the extract.

Компоненты	Большой Сияки		Малый Сияки		Джангичай	
	мас. %	Молекулярная масса	мас. %	Молекулярная масса	мас. %	Молекулярная масса
Экстракт						
В том числе:						
масла	74,9	582	72,5	495	74,5	630
асфальтены	14,9		15,3		14,4	
деасфальтены	5,1		4,4		4,7	
Компоненты экстракта, масла	74,9	–	72,5	–	74,5	–
В том числе:						
алканы	23,7	–	23,1	–	23,8	–
ароматические углеводороды	7,5	390	6,9	385	7,3	390
полярные углеводороды	43,7	360	42,5	356	43,4	360

Таблица 6. Количество органического углерода (ОУ) и факторы *A* и *C* сланцев месторождений Джангичай, Большой и Малый Сияки.
Table 6. The amount of organic carbon (OC) and factors A and C of the shales of the Dzhangichai, Bolshoy and Maliy Siyaki deposits.

Месторождение	ОУ, мас. %	Фактор	
		A	*C*
Джангичай	20,7	0,72	0,61
Большой Сияки	27,6	0,71	0,62
Малый Сияки	21,25	0,70	0,60

Джангичай (20,7 мас. %) > Малый Сияки (21,25 мас. %) > Большой Сияки (27,6 мас. %).

Идентичная зависимость была отмечена и для показателей теплоты сгорания исследуемых образцов, что находится в полном соответствии с содержанием в них органического вещества (углерода).

Плотность, зольность и содержание летучих горючих сланцев также зависят от их состава. Среди исследуемых образцов горючих сланцев наибольшая плотность была отмечена для образца месторождения Джангичай, которая составляла 2250 кг/м^3. Это значение связано с низким содержанием органического вещества в сланцах данного месторождения. Указанная взаимосвязь выражена рядом эмпирических формул [9].

При анализе золы горючего сланца был определен состав минеральной части сланца (табл. 2).

Из табл. 2 видно, что в основном элементный состав исследуемых образцов сланцев представлен, мас. %: оксидами кремния (35,89–36,94 %), кальция (21,88–22,95 %), железа (17,34–17,62 %) и серы (13,9–18,08 %). Также в незначительном

количестве присутствуют оксиды магния (0,68–1,3 %), калия (0,99–1,08 %), титана (0,88–1,43 %), марганца (0,45–1,2 %), цинка (0,14–0,89 %), фосфора (1,126–1,32 %), кобальта (0,018–0,04 %) и молибдена (0,004–2,98 %).

Результаты анализа Фишера горючих сланцев Большого и Малого Сияки, а также Джангичая представлены на рис. 2, состав газа в табл. 3, а элементного анализа сланца, смолы и твердого остатка – в табл. 4. Обращает на себя внимание высокое содержание в исследуемых образцах твердого осадка, который является востребованным сырьем во многих областях, в том числе в производстве портландцемента, удобрений. Кроме этого, в образцах горючих сланцев, было установлено содержание до 12,9–14,8 % смолы, которая считается альтернативным источником природных углеводородов, заменителем нефти [10].

По данным элементного анализа [11], количество общего углерода в составе исследуемых образцов составило 29,25 % для сланца Большой Сияки; 21,93 % для Джангичайского сланца; 22,51 мас. % для сланца Малого Сияки, из которых 1,64 %, 1,23 %, 1,26 мас. % соответственно, как установлено, приходится на долю карбонатов и, очевидно, входит в состав минеральной составляющей. Органический углерод составляет 27,6 % для сланца Большого Сияки, 20,7 % для Джангичайского сланца и 21,25 мас. % для сланца Малого Сияки и вместе с водородом, азотом и органической серой образует основу керогена. Выход смолы при анализе Фишера составляет 13,02 %, 14,75 % и 12,89 мас. % соответственно. Смола в основном состоит из углерода и водорода в примерном соотношении 7 : 1 для всех образцов, некоторого количества азота и органической серы.

Очевидно, что часть органического углерода остается в твердом остатке, в том числе и вследствие реакций уплотнения. Твердый остаток беден водородом (отношение углерода к водороду составляет 17 : 1), некоторая часть которого расходуется на образование пирогенетической воды и газообразных углеводородов в результате декомпозиционных реакций. Химический состав газов отличается высоким содержанием метана и превалированием алканов над алкенами.

Как известно, сведения о количестве и качестве органической части горючего сланца можно получить исходя из типа керогена (I – морской; II – смешанный; III – континентальный). Выход экстракта составил: для сланца Большой Сияки – 6,1 %, Малый Сияки – 5,9 %, Джангичай – 6,4 %. Основную часть всех трех экстрактов составляют масла. Результаты экстракции сланцев показаны в табл. 2 [8]. Основную часть растворенных в гексане экстрактов составляют полярные углеводороды. Исследования [8] показали, что в керогенах горючих сланцев углеводороды состоят из 20 атомов углерода и имеется 534 различных соединения, в том числе около 221 ароматических изопреноидов алканового ряда, включая трипентиноидные соединения с 80 алифатическими углеводородами. Среди определенных соединений фенолы составляют 6–7 %, нитрилы 5–6 %. Выход экстракта из Джангичайского сланца 6,6 %, из сланца Большой Сияки 8,5 %, из сланца Малый Сияки 7,1 %. Составы экстрактов из всех трех сланцев представлены в табл. 5.

Хроматографический анализ алкановой фракции из экстракта показал, что в основном присутствуют нормальные алканы, причем во всех трех экстрактах наибольшее количество приходится на фракции C_{15}–C_{28} [1, 8].

В работах [1, 8] также приведены данные ИК-спектроскопии сланцев до деминерализации и после. На основании измерения интенсивности полосы поглощения при 2930 см$^{-1}$, 2860 см$^{-1}$, 1710 см$^{-1}$, 1630 см$^{-1}$ на спектре деминерализованного керогена были рассчитаны факторы *A* и *C*. Полосы поглощения при 2930 см$^{-1}$ и 2860 см$^{-1}$ принадлежат симметрическим и асимметрическим колебаниям CH_2-группы, а полосы поглощения при 1710 см$^{-1}$ и 1630см$^{-1}$ карбонил-карбоксильным и C=C-колебаниям ароматических колец соответственно [12].

Результаты оценки спектров, а также соответствующие показатели, полученные для горючих сланцев месторождений Большой и Малый Сияки, а также Джангичай приведены в табл. 6.

Для алифатических групп фактор *A* находится по формуле:

$$A = \frac{I_{2930} + I_{2860}}{I_{2930} + I_{2860} + I_{1630}}.$$

Для карбонил-карбоксильных групп фактор *C*:

$$C_{\text{фактор}} = \frac{I_{1710}}{I_{1710} + I_{1630}}.$$

Как видно из данных табл. 6, факторы *A* и *C* внутри типов имеют близкие значения. Поэтому при термическом распаде распределение н-алканов имеет приблизительно одинаковую картину. Полученные численные значения и схожее распределение нормальных алканов позволяют сделать вывод о том, что химический состав исследуемых сланцев хорошо согласуется с керогенным типом II [13]. Так как использование высокосернистых сланцев в качестве энергетического топлива путем их прямого сжигания неэффективно, а получение бессернистых моторных топлив из сланцевых масел возможно только после достаточно дорогого процесса сероочистки, в качестве основного направления дальнейших исследований предлагается переработка горючих сланцев в комплексе с получением продуктов нефтехимического синтеза [14–17].

Заключение

Таким образом, в ходе проведенных исследований сланцев месторождений Джангичай, Большой и Малый Сияки был установлен их элементный, минеральный и компонентный состав. Установлено, что наибольшее количество органического углерода характерно для сланцев месторождения Большой Сияки. Было выявлено, что в основном минеральная часть исследуемых образцов сланцев представлена оксидами кремния (35,89–36,94 %), кальция (21,88–22,95 %), железа (17,34–17,62 %) и серы (13,9–18,08 %). Отмечена высокая ценность твердого остатка сланцев месторождений Большой и Малый Сияки, Джангичай как сырья для производства неорганических веществ, а также смолы – как сырья для нефтехимии.

Характер углеводородного состава исследуемых образцов сланцев позволил сделать вывод о том, что химический состав сланцев месторождений Большой и Малый Сияки, Джангичай хорошо согласуется с керогенным типом II.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гасанова С. М., Аджамов К. Ю., Юсифзаде А. А. Исследования в области использования горючих сланцев Азербайджана // Нефтепереработка и нефтехимия. 2013. № 2. С. 29–31.
2. Блохин А. И., Зарецкий М. И., Стельмах Г. П., Эйвазов Т. С. Новые технологии переработки высокосернистых сланцев. М.: Светлый Стан, РАН, 2001. 192 с.
3. Добрянский А. Ф. Горючие сланцы СССР. М.: Гостоптехиздат, 197. 232 с.
4. Лапидус А. Л., Стрижакова Ю. А. Горючие сланцы – альтернативное сырье для химии // Вестник РАН. 2004. № 9. С. 823–829.
5. Горючие сланцы Азербайджана. Баку. Изд-во Института геологии АН Азербайджана, 1998. 124 с.
6. Эпик И. Л. О перспективах использования битуминозных песков // Горючие сланцы. 1984. Т. 1, № 1. С. 104–106.
7. Стрижакова Ю. А., Усова Т. В. Современные направления пиролиза горючих сланцев // Химия твердого топлива. 2009. № 4. С. 8–13.
8. Керимов Х. М., Гасанова С. М. Пиролиз и определение кинетических параметров разложения горючих сланцев // Геотехнологические проблемы нефти и газа: науч. труды. 2010. Т. VII. С. 326–332.
9. Геология месторождений угля и горючих сланцев СССР. Под редакцией Погребнова Н.И., Тяжнова А. В., Шабарова Н. В. 1978. Т. 13. С. 87–89.
10. Лиштван И. И., Фалюшин П. Л., Крайко В. М., Ануфриева Е. В., Смолячкова Е. А. Состав и свойства горючих сланцев Туровского месторождения Беларуси // Химия твердого топлива. 2009. № 2. С. 3–6.
11. Ефимов В. М., Петухов Е. Ф., Дойлов С. К., Кундель Х. А. Некоторые особенности термической переработки кукерсита в промышленных условиях // Химия твердого топлива. 1981. № 1. С. 56–64.
12. ASTMD-3178-84. Test Method for Carbon and Hydrogen in the Analysis Sample of Coal and Coke, 1994.
13. Геология и геохимия нефти и газа / под. ред. Б. А. Соколова. М.: Изд-во МГУ, 2004. 415 с.
14. Гасанова С. М., Аджамов К. Ю., Юсиф-заде А. А. Использование продуктов, полученных из Джангичайского сланца Азербайджана // Изв. втузов Азербайджана. 2011. № 6. С. 18–21.
15. Pastarus J.-R., Sabanov S. A method for securing working mining block stability in Estonian oil shale mines // Proceedings of the Estonian Academy of Sciences. Engineering. 2005. Vol. 11(1). P. 59–68.
16. Krichko A. Hydrogenation of oil shale and Polymers // Oil Shale. 2000. Vol. 17, № 3. P. 271–285.
17. Nazarenko M. Yu., Kondrasheva N. K., Saltykova S. N. Product of fuel shale pyrolysis // Coke and Chemistry. 2015. Vol. 58, № 4. P. 143–146. https://doi.org/10.3103/S1068364X15040079

Статья принята в редакцию 22 апреля 2019 г.

УДК 622.337.2(07) https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-3-39-45

Physico-chemical characteristics of oil shale deposits Dzhangichay, Bolshoy Siyaki and Maliy Siyaki (Republic of Azerbaijan)

Keykavus Yusifovich ADZHAMOV[*],
Sakit Rauf ogly RASULOV[**],
Elvira Anverovna GUSEINOVA[***],
Sabina Muzayaddin GASANOVA[****]

Azerbaijan State Oil and Industry University, Baku, Republic of Azerbaijan

Relevance. Oil shale is one of the richest sources of chemical raw materials, as it is a complex organic-mineral complex: a high content of volatile substances in them with a relatively low content of non-volatile combustible mass in the residue is the basis for obtaining not only energy, but synthetic liquid fuels as well. In addition to significant oil reserves, Azerbaijan also has rich deposits of oil shale located mainly in the eastern part of the republic, as well as at the foot of the Greater Caucasus. In total, there are about 60 deposits in Azerbaijan, which are especially common in the northwestern part of the Shemakhino-Gobustan synclinorium. Combustible shales of the middle koun of Gobustan are located in the Dzhangichay, Boyan-Ata and other areas. The Dzhangichay deposit is one of the largest ones. It is located 60 km west of Baku within the area of 8 km2; the shale-bearing stratum lies at the bottom of the koun and contains oil shale strata with a thickness of up to 5 m; the total area of oil shale stratum is 11.05 km2. It should also be noted Bolshoy and Maliy Siyaki deposits; the total area of them is 22–25 km2.
Purpose: to study the physico-chemical characteristics of oil shale deposits Dzhangichay, Bolshoy and Maliy Siyaki.
Research methodology. During the study of oil shale, their ash content (GOST 11022–95), humidity (GOST 11014–2001), elemental composition (ASTM D-3178), volatile content (GOST 6382–2001), and calorific value (GOST 147–2013) were determined, the content of the organic component and mineral components.
Results In the course of studies of the shales of the Dzhangichai, Bolshoy and Maliy Siyaki deposits, their elemental, mineral and component composition was determined. The greatest amount of organic carbon is characteristic of shales of the Bolshoy Siyaki deposit. It was found that mainly the chemical composition of the studied shale samples is represented by oxides of silicon (35.89–36.94%), calcium (21.88–22.95%), iron (17.34–17.62%) and sulfur (13.9-18.08%). The high value of the solid residue of the shale of the Bolshoy and Maliy Siyaki, Dzhangichay deposits as raw materials for the production of inorganic substances, as well as resins as raw materials for the petrochemical industry, is noted. The nature of the hydrocarbon composition of the studied shales allowed us to conclude that the chemical composition of the shales of the Dzhangichai, Bolshoy and Maliy Siyaki deposits corresponds to kerogen type II.
Conclusions. Taking into account the nature of the shales in the Bolshoy and Maliy Siyaki, Dzhangichay deposits, their use as energy fuel by direct combustion will be ineffective, and the production of sulfur-free motor fuels from shale oils is possible only after a rather expensive desulfurization process. Therefore, the processing of oil shale in combination with the production of petrochemical synthesis products is proposed as the main direction of further research.

Keywords: oil shale, deposits Dzhangichay, Bolshoy and Maliy Siyaki, resin, solid residue, kerogen.

REFERENCES

1. Gasanova S. M., Adjamov K. Yu., Yusifzade A. A. 2013, Research in the field of the use of oil shale in Azerbaijan. *Neftepererabotka i neftechimiya* [Oil Processing and Petrochemistry], no. 2, pp. 29–31. (*In Russ.*)
2. Blokhin A. I., Zaretskiy M. I., Stel'makh G. P., Eyvazov T. S. 2001, *Novyye tekhnologii pererabotki vysokosernistykh slantsev* [New technologies for processing high-sulfur shales], 192 p.
3. Dobryanskiy A. F. 1990, *Goryuchiye slantsy* [Oil shales], 232 p.
4. Lapidus A. L., Strizhakova Yu. A. 2004, Oil shale is an alternative raw material for chemistry. *Vestnik RAN* [Herald of the Russian Academy of Sciences], no. 9, pp. 823–829. (*In Russ.*)
5. 1998, *Goryuchiye slantsy Azerbaydzhana* [Oil shales of Azerbaijan]. Baku, 124 p.
6. Epik I. L. 1984, *O perspektivakh ispol'zovaniya i bituminoznykh peskov* [On the prospects of use of oil-bearing sand]. *Oil shales*, vol. 1, no. 1, pp. 104–106.
7. Strizhakova Yu. A., Usova T. V. 2009, Modern trends in the pyrolysis of oil shales. *Khimiya tverdogo topliva* [Solid fuel chemistry], no. 4, pp. 8–13. (*In Russ.*)
8. Kerimov KH. M., Gasanova S. M. *Piroliz i opredeleniye kineticheskikh parametrov razlozheniya goryuchikh slantsev* [Pyrolysis and determination of the kinetic parameters of the decomposition of oil shale]. *Geotechnological problems of oil and gas: scientific works*, vol. VII, pp. 326–332.
9. 1978, *Geologiya mestorozhdeniy uglya i goryuchikh slantsev SSSR* [Geology of coal deposits and oil shale of the USSR], vol. 13, pp. 87–89.
10. Lishtvan I. I., Falyushin P. L., Kraiko V. M., Anufrieva E. V., Smolyachkova E. A. 2009, Composition and properties of oil shale of the Turovsky deposit in Belarus. *Khimiya tverdogo topliva* [Solid fuel chemistry], no. 2, pp. 3–6. (*In Russ.*)
11. Efimov V. M., Petukhov E. F., Doylov S. K., Kundel H. A. 1981, Some features of the thermal processing of kukersite in industrial conditions. *Khimiya tverdogo topliva* [Solid fuel chemistry], no. 1, pp. 56–64. (*In Russ.*)
12. 1994, ASTMD-3178-84. Test Method for Carbon and Hydrogen in the Analysis Sample of Coal and Coke.
13. 2004, *Geologiya i geokhimiya nefti i gaza* [Geology and geochemistry of oil and gas], ed. by B. A. Sokolov. Moscow, 415 p.
14. Gasanova S. M., Adjamov K. Yu., Yusif-zade A. A. 2011, Use of products obtained from the Dzhangichay shale of Azerbaijan. *Izvestiya vysshikh tekhnicheskikh uchebnykh zavedeniy Azerbaydzhana* [Transactions of Azerbaijan Institutes of Technology], no. 6, pp. 18–21.
15. Pastarus J.-R., Sabanov S. 2005, A method for securing working mining block stability in Estonian oil shale mines. Proceedings of the Estonian Academy of Sciences. Engineering, vol. 11(1), pp. 59–68.
16. Krichko A. 2000, Hydrogenation of oil shale and Polymers. *Oil Shale*, vol. 17, no. 3, pp. 271–285.
17. Nazarenko M. Yu., Kondrasheva N. K., Saltykova S. N. 2015, Product of fuel shale pyrolysis. *Coke and Chemistry*, vol. 58, no. 4, pp. 143–146. https://doi.org/10.3103/S1068364X15040079

The article was received on April 22, 2019

[*] ✉ adjamovkeykavus@gmail.com
[**] rasulovsakit@gmail.com
https://orcid.org/0000-0002-1548-3143
[***] elvira_huseynova@mail.ru
https://orcid.org/0000-0003-0297-1516
[****] sabuna75@mail.ru

УДК 553.493+552.3 https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-3-46-57

Рудные ниобиевые минералы группы пирохлора карбонатитовых комплексов Урала: особенности состава и геохимическая эволюция

Ирина Леонидовна НЕДОСЕКОВА*,
Сергей Владимирович ПРИБАВКИН**

Институт геологии и геохимии им. А. Н. Заварицкого УрО РАН, Россия, Екатеринбург

Актуальность исследований определяется широким развитием карбонатитовых комплексов линейного типа в складчатых областях, их более слабой изученностью по сравнению с платформенными карбонатитовыми комплексами, в том числе их рудного потенциала. Актуальными вопросами остаются генезис Zr–Nb–REE-оруденения, соотношение рудной минерализации с магматическим фазами внедрения и процессами метаморфизма, а также длительность формирования редкометалльных месторождений в линейных карбонатитовых комплексах складчатых областей.
Цель исследований – разработка проблемы редкометалльного рудообразования в линейных карбонатитовых комплексах складчатых областей на примере Урала, включая характеристику рудных минералов группы пирохлора, особенностей их состава и геохимической эволюции.
Результаты исследований. Изучены особенности состава и геохимической эволюции рудных ниобиевых минералов группы пирохлора из основных типов пород редкометалльных месторождений, связанных со щелочно-карбонатитовыми комплексами Урала. Исследованы пирохлоры Вишневогорского и Потанинского месторождений ниобия, рудопроявлений Увильды и Пургино (Ильмено-Вишневогорский миаскит-карбонатитовый комплекс), а также Буллдымского REE–Nb месторождения (Буллдымский ультрабазит-карбонатитовый комплекс), Южный Урал. Установлены несколько минеральных видов пирохлора – гидроксил- и оксикальциопирохлор U(Ta)-содержащий, фторкальциопирохлор (в том числе Ta- и Sr–REE содержащие разновидности), гидроксилкальциопирохлор, кено- и гидропирохлор. Их формирование которых связано с определенными эволюционными стадиями функционирования щелочно-магматической системы и вторичными преобразованиями пирохлоров. Закономерности эволюции химизма пирохлоров – последовательное изменение составов уранпирохлора с увеличением F и Nb (раннекарбонатитовый тренд) и резкая смена состава кристаллизующихся фторкальциопирохлоров (позднекарбонатитовый тренд) – фиксируют резкую смену условий и химизма среды минералообразования.
Выводы. Проведенные исследования рудных ниобиевых минералов группы пирохлора редкометалльных месторождений, связанных с линейными карбонатитовыми комплексами Урала, свидетельствуют о том, что руды месторождений были сформированы в результате двух этапов рудообразования.

Ключевые слова: пирохлор, ниобиевые месторождения, линейные карбонатитовые комплексы, Урал.

Введение

Карбонатитовые комплексы линейного типа известны как важный источник редкометалльно-редкоземельной (Nb, Zr, РЗЭ) и самоцветной минерализации. Они выявлены как на территории России (Ильмено-Вишневогорский, Булдымский, Урал; Пенченгинский, Енисейский кряж), так и за рубежом (Сиилинъярви, Финляндия; Черниговский, Украина; Лонни, Пери-Ривер, Верайти, Кастингтон, Кравье, Нисикатч, Канада) [1]. С карбонатитами этого типа связаны промышленные месторождения ниобия и циркония. На Урале это Вишневогорское и Потанинское ниобиевые месторождения, а также ряд рудопроявлений – Светлоозерское, Увильдинское, Байдашевское, Ишкульское и другие, связанные с карбонатитами миаскитового массива и его фенитового ореола. Кроме того, известны редкоземельно-ниобиевые Булдымское и Спирихинское месторождения, а также Халдихинское и Ильменское рудопроявления, приуроченные к породам ультраосновного состава.

Рудная ниобиевая минерализация карбонатитовых комплексов Урала представлена минералами группы пирохлора, реже встречаются колумбит, эшинит, ферсмит, ильменорутил, чевкинит-(Ce) [В. Я. Левин и др., 1997]. Основным рудным минералом, резко доминирующим над другими, является пирохлор. Его изучением занимались многие исследователи редкометалльных месторождений Ильмено-Вишневогорского комплекса – Э. М. Бонштедт-Куплетская [2], Е. М. Еськова, И. И Назаренко [3], Е. М. Еськова, А. Г. Жабин, Г. Н. Мухитдинов [4], А. Ф. Ефимов и др. [5], В. Я. Левин и др., [6], В. И. Попова и др. [7]. Результаты этих исследований показали, что минералы группы пирохлора разнообразны по составу и могут быть отнесены к разным минеральным видам.

Несмотря на значительную изученность минералов группы пирохлора карбонатитовых комплексов Урала, до настоящего времени остаются актуальными вопросы генезиса Nb-оруденения и длительности этапов рудообразования на месторождениях, связанных с линейными карбонатитовыми комплексами. Целью наших исследований является разработка фундаментальной проблемы редкометалльного рудообразования в линейных карбонатитовых комплексах на примере Урала, включая характеристику рудной редкометалльной минерализации, изучение особенностей состава рудных минералов, их геохимической эволюции, а также оценку длительности формирования редкометалльного оруденения.

Краткая геологическая характеристика карбонатитовых комплексов и месторождений пирохлора

Ильмено-Вишневогорский миаскит-карбонатитовый комплекс находится на стыке Среднего и Южного Урала, в осевой части Сысертско-Ильменогорского антиклинория, который представляет собой блок докембрийского фундамента (микроконтинент), залегающий среди палеозойских (O–D) океанических и островодужных комплексов. Ильмено-Вишневогорский комплекс простирается с севера на юг более чем на 150 км с максимальной шириной 4–6 км и состоит из двух карбонатитсодержащих миаскитовых плутонов (20–25 × 6 км) – Вишневогорского и Ильменогорского, соединенных Центральной щелочной полосой, сложенной фенитами, жильными миаскитами, силикокарбонатитами и карбонатитами (рис. 1). Щелочные нефелин-микроклиновые и сиенитовые биотит-микроклиновые, эгирин-авгит-микроклиновые пегматиты развиты внутри и по периферии миаскитовых массивов.

В составе миаскитовых массивов ранние карбонатиты (севиты I) представлены массивными и брекчиевидными разностями кальцитового состава, содержащими автолиты – перемещенные округлые включения миаскитов и миаскит-пег-

* vladi49@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0001-7952-0639
**pribavkins@gmail.com

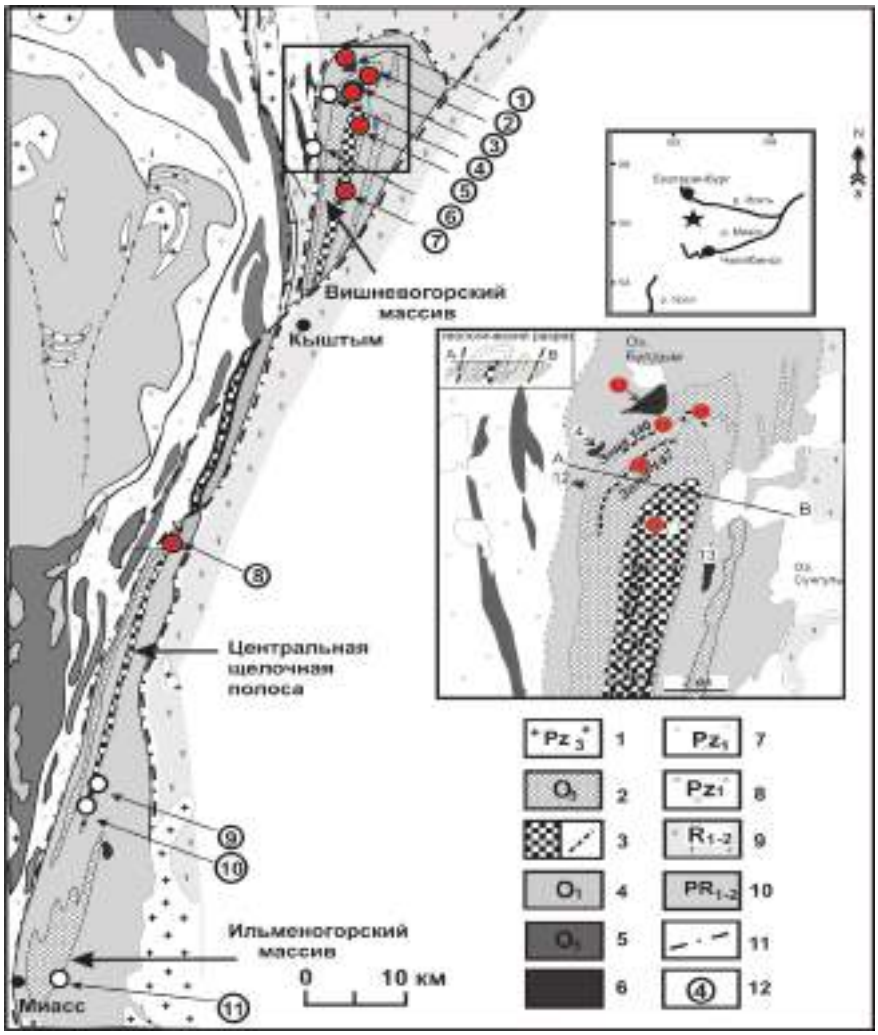


Рисунок 1. Схема геологического строения Ильмено-Вишневогорского и Булдымского карбонатитовых комплексов Южного Урала с основными месторождениями и рудопроявлениями Nb, Zr и РЗЭ (по материалам [6, 28]). 1 – граниты (Pz_3); 2, 3 – Ильмено-Вишневогорский комплекс (O_3): 2 – миаскиты Вишневогорского и Ильменогорского массивов, 3 – зоны метасоматитов, карбонатитов, силикатно-карбонатных пород Центральной щелочной полосы; 4 – габбро офиолитовой формации (O_1); 5 – гипербазиты офиолитовой формации (O_1); 6 – метаультрабазиты Булдымского комплекса (PR?); 7 – вулканогенно-осадочные образования Тагило-Магнитогорского мегасинклинория (Pz_1); 8 – сланцы гранато-слюдяные и эклогиты восточной периферии Уфалейского срединного массива (Pz_1); 9 – плагиосланцы и кварциты обрамления Сысертско-Ильменогорского срединного массива (R1-2); 10 – плагиогнейсы, гранитные мигматиты, кристаллические сланцы, амфиболиты, кварциты Сысертско-Ильменогорского и Уфалейского срединных массивов (PR_{1-2}); 11 – тектонические разломы и несогласия; 12 – основные месторождения и рудопроявления Nb и РЗЭ, связанные с карбонатитами (цифры в кружках): 1 – Булдымское (Nb и РЗЭ), 2, 3 – Вишневогорское – Nb (2 – зона 125; 3 – зона 140, 3а – 147), 4 – Спирихинское (РЗЭ), 5 – Светлинское (Nb), 6 – Каганское (РЗЭ), 7 – Потанинское (Nb), 8 – Увильдинское (Nb), 9 – Байдашевское (Nb), 10 – Ишкульское (Nb), 11 – Ильменское, копь 97 (Nb и РЗЭ), 12 – Халдихинское, 13 – Сунгульское. Залитые красным кружки – точки опробования.

Figure 1. Scheme of the geological structure of the Ilmeno-Vishnevogorsk and Buldym carbonatite complexes in the South Urals with the main deposits and ore occurrences of Nb, Zr and REE (based on materials [6, 28]). 1 – granites (Pz3); 2, 3 – Ilmeno-Vishnevogorsky complex (O3): 2 – miaskites of the Vishnevogorsky and Ilmenogorsky massifs, 3 – zones of metasomatites, carbonatites, silicate-carbonate rocks of the Central alkaline strip; 4 – gabbro of the ophiolite formation (O1); 5 – hyperbasites of the ophiolite formation (O1); 6 – meta-ultrabasites of the Buldym complex (PR?); 7 – volcanic-sedimentary formations of the Tagil-Magnitogorsk megasynclinorium (Pz1); 8 – schist garnet-mica and eclogites of the eastern periphery of the Ufaleysky middle massif (Pz1); 9 – plagioclades and quartzites of the framing of the Sysert-Ilmenogorsk middle massif (R1-2); 10 – plagiogneisses, granite migmatites, crystalline schists, amphibolites, quartzites of the Sysert-Ilmenogorsky and Ufaleysky middle massifs (PR1–2); 11 – tectonic faults and disagreements; 12 – the main deposits and ore occurrences of Nb and REE associated with carbonatites (figures in circles): 1 – Buldymskoye (Nb and REE), 2, 3 – Vishnevogorsk - Nb (2 - zone 125; 3 – zone 140, 3a - 147), 4 – Spirikhinsky (REE), 5 – Svetlinsky (Nb), 6 – Kagan (REE), 7 – Potaninsky (Nb), 8 – Uvildinsky (Nb), 9 - Baidashevsky (Nb), 10 – Ishkulsky (Nb), 11 – Ilmensky, mine 97 (Nb and REE), 12 – Khaldikhinsky, 13 – Sungulsky. Red circles – points for testing.

матитов и минералы миаскитов (нефелин, полевые шпаты, биотит), а также акцессорные черный (гатчеттолит) и красно-бурый пирохлор, циркон, ильменит, апатит, магнетит, пирротин, пирит. Поздние карбонатиты (севиты II) образуют гнезда и жилы в телах ранних карбонатитов и нефелиновых сиенитах, а также образуют штокверки и жильные тела выполнения в экзоконтактовых фенитовых ореолах миаскитовых интрузивов. Поздние карбонатиты – крупнозернистые, с крупными (до 10–20 см) кристаллами биотита, апатита, пирохлора, акцессорным ильменитом, пирротином, пиритом.

Наиболее крупное Вишневогорское месторождение пирохлора приурочено к северному замыканию одноименного массива миаскитов. Оно представляет собой три рудные зоны развития пирохлорсодержащих карбонатитов и миаскит-пегматитов. Первая рудная зона (или зона 147) имеет протяженность 4 км и ширину 30 м. Она сложена пластообразными и жильными телами карбонатитов мощностью до 10 м и протяженностью в сотни метров в эндоконтакте миаскитового массива.

Вторая рудная зона (зона 140) приурочена к северному сателлитному телу миаскитов («седловидной залежи»), залегающему в 50 м к северу от Вишневогорского массива, и сложена системой субпараллельных жил карбонатитов, альбититов и миаскитовых пегматоидов. Третья рудная зона (зона 125) расположена в фенитовом ореоле Вишневогорского интрузива среди фенитизированных пород вишневогорской гнейс-амфиболитовой свиты, образуя штокверки и жильные тела выполнения.

Второе по значимости Потанинское месторождение пирохлора расположено в Центральной щелочной полосе (рис. 1). Оно представляет собой линейную, иногда штокверковидную, зону карбонатитов в миаскитах и фенитах протяженностью около 15 км и мощностью до 40 м. Кроме того, здесь известны другие сходные по строению рудопроявления Ишкульское, Байдашевское, Увильдинское и Светлоозерское [6].

В состав Булдымского ультрабазит-карбонатитового комплекса входят Булдымский, Спирихинский, Халдихинский массивы. Они сложены метадунитами, метаоливинитами, оливин-энстатитовыми породами с линейными зонами щелочных метасоматитов и карбонатитов, содержащих REE–Nb-минерализацию. Массивы ультрабазитов с карбонатитами залегают в обрамлении Вишневогорского и Ильменогорского миаскитовых интрузивов среди докембрийских пород вишневогорской и ильменогорской свит (PR_1) [6, 8]. Особенно широко карбонатиты развиты в Булдымском ультрабазитовом массиве, который образует линзовидное тело размером 1,5 × 1 км и залегает в 100 м к северу от седловидной залежи Вишневогорского массива миаскитов (рис. 1).

Наиболее крупное Булдымское Nb–TR-месторождение связано с карбонатитам и щелочными метасоматитами, приуроченными к системе разломов субширотного простирания в одноименном массиве ультрабазитов. Карбонатиты образуют зоны развития жил протяженностью в сотни метров и сопровождаются мощными карбонат-флогопит-рихтеритовыми, флогопит-рихтеритовыми и флогопитовыми метасоматитами (апогипербазитовые фениты), также несущими редкометалльно-редкоземельную минерализацию. Суммарная мощность зон карбонатитов и сопровождающих их метасоматитов достигает 50 м. Среди карбонатитов выделяются доломит-кальцитовые карбонатиты (севиты III) и доломитовые (бефорситы IV). Первые содержат тетраферрифлогопит, фторрихтерит и акцессорные пирохлор, циркон, магнетит, ильменит, пирротин, пирит. Вторые содержат редкоземельную минерализацию, представленную монацитом-(Ce), эшинитом-(Ce), U-пирохлором, REE-пирохлором, колумбитом, ортитом-(Ce), хромчевкинитом, молибденитом [6, 8].

Помимо Булдымского месторождения с ультрабазит-карбонатитовым комплексом связано Спирихинское месторождение редких земель в одноименном массиве ультрабазитов, а также Халдихинское и Ильменское Nb–REE рудопроявления (рис. 1). В наиболее изученном Ильменском рудопроявлении (Копь 97), расположенном к востоку от Ильменогорского массива миаскитов и залегающем среди ультрабазитов восточного крыла ильменогорской антиклинали, установлены монацит-(Ce), торит, эшинит-(Ce), фергусонит-(Ce), бастнезит-(Ce), хромистый давидит-(Ce), ортит-(Ce), ильменорутил, хромагнезиочевкинит-(Ce) [9].

Методы и материалы исследования

Нами изучены коллекции рудных ниобиевых минералов группы пирохлора из редкометалльных месторождений и рудопроявлений Ильмено-Вишневогорского комплекса (Вишневогорское, Потанинское месторождения; рудопроявления Увильдинское, Пургино) и Булдымского комплекса (Булдымское месторождение), переданные нам первооткрывателем этих месторождений В. Я. Левиным, а также авторские коллекции рудных минералов. Всего исследовано 20 образцов и около 200 зерен минералов группы пирохлора из основных типов пород и руд.

Внутреннее строение и состав минералов группы пирохлора предварительно были исследованы на сканирующем электронном микроскопе JSM-6390LV фирмы Jeol с ЭДС приставкой INCA Energy 450 X-Max 80 фирмы OxfordInstruments в Центре коллективного пользования УрО РАН «Геоаналитик», г. Екатеринбург (аналитик И. А. Готтман). Условия съемки: ускоряющее напряжение 20–25 кВ и зондовый ток 1 нА, низкий вакуум 60–80 Па.

Прецизионное определение химического состава пирохлоров выполнено на электронном микрозонде «CAMEBAX-micro» в ИГМ СО РАН, Новосибирск (аналитик В. В. Шарыгин) и на электронно-зондовом микроанализаторе Cameca SX100 в ЦКП «Геоаналитик» (аналитик Д. А. Замятин). В качестве стандартов использовались: апатит (для анализа содержания F, P), жадеит (Na), родонит (Mn), $CaSiO_3$ (Ca, Si), TiO_2 (Ti), Fe_2O_3(Fe), ThO_2 (Th), UO_2 (U), $PbSO_4$ (Pb), металлический Nb (Nb), Ta_2O_5 (Ta), $SrSO_4$ (Sr), $BaSO_4$ (Ba) алюмосиликатные стекла, легированные РЗЭ (La, Ce, Y). Анализ пирохлоров проводился при ускоряющем напряжении 15 кВ и токе электронного зонда 20 нА с использованием кристалл-анализаторов TAP, LPC0, LPET, PET, LIF. Время накопления импульсов в максимуме пика выбрано от 10 до 30 с. Пределы обнаружения F, Na, Si, P, Ca, Sr, Y, Th составили 0,02–0,1 мас. %; Ti, Mn, Fe, Ba, La, U – 0,1–0,2 мас. %; Nb, Ce – 0,2–0,3 мас. %; Pb – 0,3–0,4 мас. %; Ta – 0,6–0,7 мас. %.

В Ильмено-Вишневогорском комплексе изучены образцы пирохлоров из разновозрастных и разнофациальных карбонатитов – силикокарбонатитов, включая 3 образца ранних карбонатитов (севиты I) и 8 образцов поздних карбонатитов (севиты II). Также изучены 1 образец из пегматоидного миаскита, 3 образца из миаскит-пегматита и 3 образца из пироксен-полевошпатовых жил фенитового ореола. В Булдымском комплексе изучены пирохлоры ранних доломит-кальцитовых карбонатитов (севитов III), а также 2 образца слюдистых метасоматитов. Представительные анализы разновидностей минералов группы пирохлора приведены в таблице.

В миаскитах Ильмено-Вишневогорского комплекса пирохлор представлен октаэдрическим кристаллами темно-бурого, иногда оранжевого цвета размером 0,01–0,1 мм. В пегматоидных разностях миаскитов размеры пирохлора увеличиваются до 0,5 см, а в пегматитах – до нескольких сантиметров. В миаскит-пегматитах наиболее часто встречаются красновато-бурые и темно-коричневые кристаллы, реже желтовато-бурые и темно-красные, иногда проявлена ростовая зональность с чередованием темноокрашенных и светлых зон.

В силикокарбонатитах (меланократовых карбонатно-силикатных породах) и в ранних карбонатитах (севитах I) месторождений и рудопроявлений Центральной щелочной полосы (Потанинское месторождение, Увильдинское рудопроявление) пирохлор встречается в виде мелких кристаллов и округлых зерен черного и зеленовато-черного цвета и представлен U–(Ta)-содержащей разновидностью (уранпирохлором). Поверхность зерен уранпирохлоров часто имеет сферические каверны, вероятно, представляющие собой области разрушения от пробега альфа-частиц в результате радиоактивного

распада U и Th (рис. 2, а). Часто зерна и кристаллы уранпирохлора с краев и по системам трещин подверглись вторичным изменениям различной степени с образованием концентрических текстур и трещин разбухания (рис. 2, б).

В ранних карбонатитах (севитах I) Центральной щелочной полосы также встречаются зерна пирохлора темно-бурого цвета, содержащие мультифазные включения (апатит, кальцит, калишпат, хлорит, титангематит), которые могут являться результатом захвата пирохлором богатого CO_2 и H_2O расплава (рис. 2, в). Уникальной особенностью уранпи-

Представительные химические составы (мас. %) и формулы (форм. ед.) минералов группы пирохлора из пород и руд редкометалльных месторождений карбонатитовых комплексов Урала.
Representative chemical compositions (wt. %) and formulas (units) of pyrochlore group minerals from rocks and ores of rare-metal deposits of the Ural carbonatite complexes.

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8
Образец	748-10	К-37-95	К2-18	Дол-21	Krv5-2	43-62	85-727	ЛК-147
Точки анализа	2	2c	1	5	2r	3	3	12
Nb_2O_5	42,56	38,72	46,29	63,93	62,59	61,66	67,99	65,94
Ta_2O_5	5,88	4,02	0,84	2,97	1,92	3,53	0,00	0,00
TiO_2	11,03	12,50	8,52	4,28	4,08	4,89	3,73	4,16
ZrO_2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,04
UO_2	21,25	22,11	17,57	0,00	1,71	1,80	0,00	0,06
ThO_2	0,05	0,78	0,69	0,53	0,35	1,59	0,27	0,26
Fe_2O_3	0,10	0,00	1,54	0,08	0,00	0,07	0,11	0,00
Y_2O_3	0,00	0,12	0,11	Н/о	0,01	Н/о	Н/о	0,03
La_2O_3	0,00	0,31	0,18	0,56	0,01	0,22	0,24	0,13
Ce_2O_3	0,06	0,72	0,40	1,35	0,08	0,82	0,57	0,22
Nd_2O_3	0,00	0,94	0,84	0,40	0,12	0,26	0,10	0,07
MnO	0,00	0,00	0,11	Н/о	0,01	Н/о	Н/о	0,00
MgO	0,00	0,03	0,03	Н/о	0,00	Н/о	Н/о	Н/о
CaO	11,77	11,26	13,91	14,91	16,10	15,47	15,94	16,54
BaO	0,00	0,00	0,00	Н/о	0,43	Н/о	Н/о	0,00
SrO	0,17	0,28	0,17	0,68	0,72	0,39	0,29	0,71
PbO	0,00	0,91	0,95	н,о	0,22	Н/о	Н/о	0,01
Na_2O	4,96	5,51	4,88	6,93	7,25	6,51	7,20	7,46
K_2O	0,00	0,01	0,00	Н/о	0,01	Н/о	Н/о	0,02
F	1,70	1,44	1,99	5,14	5,10	4,74	5,36	5,26
$O=F_2$	0,72	0,61	0,84	2,16	2,15	2,00	2,26	2,21
Total	98,81	99,81	98,80	99,60	98,58	99,95	99,54	98,81
Позиция B								
Nb	1,317	1,250	1,455	1,752	1,773	1,712	1,828	1,809
Ta	0,109	0,078	0,016	0,049	0,033	0,059	0,000	0,000
Ti	0,568	0,672	0,445	0,195	0,192	0,226	0,167	0,190
Fe3+	0,005	0,000	0,081	0,004	0,000	0,003	0,005	0,000
Sum B	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000
Позиция A								
Ca	0,863	0,862	1,036	0,968	1,081	1,018	1,016	1,075
Mn	0,000	0,000	0,007	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Ba	0,000	0,000	0,000	0,000	0,011	0,000	0,000	0,000
Sr	0,007	0,011	0,007	0,024	0,026	0,014	0,010	0,025
Pb	0,000	0,018	0,018	0,000	0,004	0,000	0,000	0,000
Na	0,658	0,763	0,657	0,815	0,881	0,775	0,830	0,878
K	0,000	0,001	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,001
Y	0,000	0,004	0,004	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001
LREE	0,002	0,051	0,036	0,051	0,005	0,029	0,020	0,009
U	0,324	0,351	0,272	0,000	0,024	0,025	0,000	0,001
Th	0,001	0,013	0,011	0,007	0,005	0,022	0,004	0,004
Sum A	1,855	2,077	2,050	1,866	2,037	1,883	1,880	1,994
A-deficit	0,145	–0,077	–0,050	0,134	–0,037	0,117	0,120	0,006
F	0,368	0,325	0,438	0,986	1,011	0,921	1,008	1,047

Продолжение таблицы

№ п/п	9	10	11	12	13	14	15	16
Образец	3296	92	92	КК-2	Дол-7	331* ядро	331* ядро_изм	331* кайма
Точки анализа	3	10c	10r	9r	3	6-1c	6-2c_alt	6-3r
Nb_2O_5	66,95	60,59	60,17	62,47	67,14	60,33	52,08	59,26
Ta_2O_5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,31	0,00	0,00
TiO_2	2,96	6,80	6,64	5,21	3,52	4,45	4,42	3,51
ZrO_2	0,09	0,00	0,09	0,00	0,00	1,58	0,00	0,00
UO_2	0,00	0,45	0,52	0,04	0,09	3,72	3,72	0,85
ThO_2	0,51	0,75	0,88	0,98	0,41	0,3	0,53	0,59
Fe_2O_3	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	1,52	1,69	1,5
Y_2O_3	0,00	0,09	0,03	Н/о	Н/о	0,1	0	0,03
La_2O_3	0,05	0,85	0,95	2,08	0,65	0,37	0,7	1,08
Ce_2O_3	0,20	1,99	2,49	4,13	1,33	1,52	2,42	2,98
Nd_2O_3	0,06	0,63	0,81	1,13	0,23	Н/о	Н/о	Н/о
MnO	0,01	0,01	0,04	Н/о	Н/о	0,21	0,42	0,5
MgO	Н/о	0,00	0,00	Н/о	Н/о	Н/о	Н/о	Н/о
CaO	16,21	14,68	13,77	11,33	13,74	11,7	6,04	12,24
BaO	0,00	0,00	0,00	Н/о	Н/о	0,77	2,39	0,73
SrO	0,67	0,99	1,03	1,08	2,15	1,97	5,01	3,27
PbO	0,04	0,02	0,11	Н/о	Н/о	0,48	0,31	0,05
Na_2O	7,50	7,29	7,34	7,72	7,37	3,64	0,05	2,09
K_2O	0,01	0,01	0,02	Н/о	Н/о	Н/о	Н/о	Н/о
F	5,03	5,62	5,55	5,16	5,20	2,76	0,24	2,13
$O=F_2$	2,12	2,37	2,34	2,17	2,19	1,16	0,10	0,90
Total	98,19	98,74	98,45	99,15	99,64	95,71	80,02	90,81
Позиция B								
Nb	1,859	1,686	1,687	1,756	1,840	1,850	1,632	1,593
Ta	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,005	0,002
Ti	0,136	0,314	0,309	0,244	0,160	0,149	0,200	0,177
Fe3+	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000	0,001	0,068	0,034
Sum B	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000
Позиция A								
Ca	1,066	0,968	0,915	0,755	0,892	0,864	0,460	0,738
Mn	0,001	0,001	0,002	0,000	0,000	0,002	0,011	0,075
Ba	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	Н/о	0,015
Sr	0,024	0,035	0,037	0,039	0,076	0,064	0,018	0,143
Pb	0,001	0,000	0,002	0,000	0,000	0,008	0,068	0,006
Na	0,893	0,869	0,882	0,931	0,866	0,795	0,008	0,216
K	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,422	0,000
Y	0,000	0,003	0,001	0,000	0,000	0,005	0,000	0,000
LREE	0,007	0,078	0,096	0,167	0,049	0,059	0,003	0,107
U	0,000	0,006	0,007	0,000	0,001	0,003	0,0415	0,005
Th	0,007	0,010	0,012	0,014	0,006	0,006	0,050	0,010
Sum A	2,000	1,971	1,956	1,906	1,890	1,806	0,004	1,316
A-deficit	0,000	0,029	0,044	0,094	0,110	0,194	1,374	0,684
F	0,977	1,094	1,089	1,015	0,997	0,813	0,522	0,353

The chemical composition of the pyrochlore was determined using a CAMEBAX microprobe at 60 nA and 20 kV, the probe beam size was 2 μm (IGM SB RAS, Novosibirsk, analyst VV Sharygin); 14–16 - with a Cameca-100 microprobe (IGG UB RAS, analyst is D. V. Zamyatin); 1–3 – U– (Ta) – containing oxycalciopyrochlore: 1 – from silicate-carbonate rocks (Uvildinsky ore occurrence, CSCP), 2 – from Sevites I (Potaninsky deposit); 3 – from micas (Buldym field); 4–6 – Ta-containing fluoro-calcium-pyrochlors: 4–5 – from Ne-pegmatites (Vishnevogorsk deposit), 4 – zone 147, 5 – vein No 5, Karavai; 6 – from Sevites I (Potaninskoe deposit); 7–9 – fluorcalciopyrochlore: 7 – from pegmatoid miaskites (ore zone 140), 8 – from Sevites I (ore zone 147, Vishnevogorsk deposit); 9 – from Sevites III, Buldym field; 10–12 – REE–(Sr)–containing fluoro-calcium-pyrochlore: 10–11 – from Sevit II, Potaninskoye deposit, 12 – from Sevit II, Uvildinskoye ore occurrence; 13 - from Sevite II (ore zone 147, Vishnevogorsk deposit); 14–16 – Sr–(REE)–containing hydro-pyrochlore with relic nuclei of U-containing pyrochlore: 15, 16 – grain core, 16 – grain edge.

Химический состав пирохлоров определен на микрозонде CAMEBAX при 60 нА и 20 кВ, размер пучка зонда – 2 μm (ИГМ СО РАН, г. Новосибирск, аналитик В. В. Шарыгин); 14–16 – на микрозонде Cameca-100 (ИГГ УрО РАН, аналитик Д. В. Замятин); 1–3 – U–(Ta)-содержащие оксикальциопирохлоры: 1 – из силикатно-карбонатных пород (Увильдинское рудопроявление, ЦЩП), 2 – из севитов I (Потанинское месторождение); 3 – из слюдитов (Булдымское месторождение); 4–6 – Ta-содержащие фторкальциопирохлоры: 4–5 – из Ne-пегматитов (Вишневогорское месторождение), 4 – зона 147, 5 – жила № 5, г. Каравай; 6 – из севитов I (Потанинское месторождение); 7–9 – фторкальциопирохлоры: 7 – из пегматоидных миаскитов (рудная зона 140,), 8 – из севитов I (рудная зона 147, Вишневогорское месторождение); 9 – из севитов III, Булдымское месторождение; 10–12 – REE–(Sr)-содержащие фторкальциопирохлоры: 10–11 – из севитов II, Потанинское месторождение, 12 – из севитов II, Увильдинское рудопроявление; 13 – из севитов II (рудная зона 147, Вишневогорское месторождение); 14–16 – Sr–(REE)-содержащий гидропирохлор с реликтовыми ядрами U-содержащего пирохлора: 15, 16 – ядро зерна, 16 – край зерна.

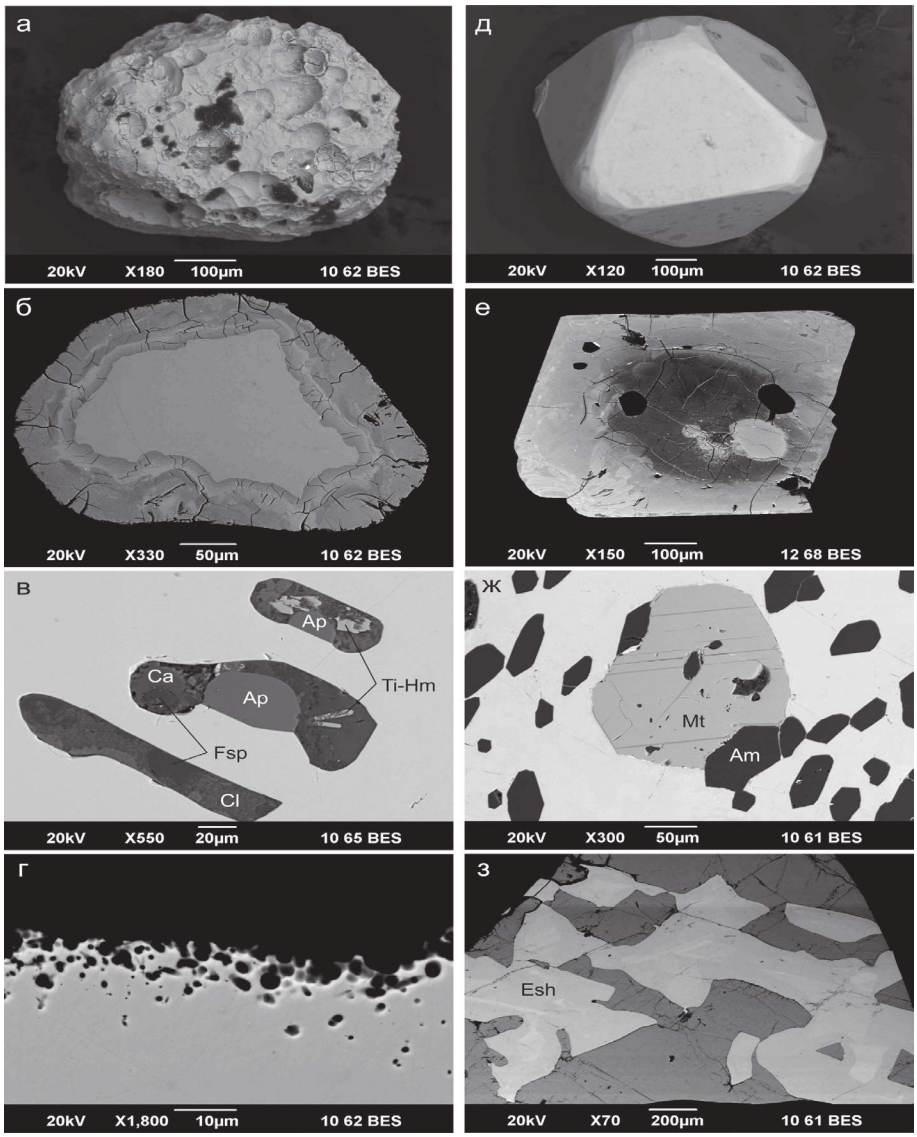


Рисунок 2. Морфология и особенности внутреннего строения кристаллов пирохлора. Ильмено-Вишневогорский комплекс: а–в – пирохлоры ранней карбонатитовой стадии, Потанинское месторождение: а – зерно U–(Ta)-пирохлора со сферическими кавернами (севит I); б – внутренне строение гидратированного U–(Ta)-пирохлора (севит I); гидратация пирохлора с краев вызывает образование концентрических текстур и сопровождается трещинами разбухания; в – многофазные включения в зерне фторкальциопирохлора из севита I; г–е – пирохлоры позднекарбонатитовой стадии: г – (REE-Sr)-пирохлор, содержащий в краевой части пузыри, севит II, Потанинское месторождение, д – кубооктаэдрический кристалл (Sr–REE)-пирохлора, севит II, Вишневогорское месторождение; е – внутреннее строение кристалла пирохлора: реликтовое ядро, сложенное гидратированным U-содержащим пирохлором (темно-серое в BSE), окаймленное(Sr–REE)-пирохлором (светло-серое в BSE), Вишневогорское месторождение; Булдымский комплекс: ж – кристаллы пирохлора с многочисленными включениями амфибола (фторрихтерита) и магнетита из флогопит-рихтеритовых метасоматитов, з – REE–Th-пирохлор в срастании с эшинитом из слюдистых метасоматитов, Булдымское месторождение; Am – амфибол, Mt – магнетит, Ti–Hm – титан–гематит, Ca – кальцит, Ap – апатит, Cl – хлорит, Esh – эшинит.

Figure 2. Morphology and features of the internal structure of pyrochlore crystals. Ilmeno-Vishnevogorsk complex: а–в – pyrochlore of the early carbonatite stage, Potaninskoe deposit: a – grain of U–(Ta) pyrochlore with spherical caverns (sevite I); б – the internal structure of hydrated U–(Ta) pyrochlore (Sevit I); hydration of pyrochlore from the edges causes the formation of concentric textures and is accompanied by swelling cracks; c – multiphase inclusions in the grain of fluorocalciopyrochlore from Sevit I; г–е – pyrochlore of the late carbonate stage: г – (REE-Sr) pyrochlore containing bubbles in the marginal part, sevite II, Potaninskoe deposit, д – cuboctahedral crystal (Sr – REE) pyrochlore, sevite II, Vishnevogorsk deposit; e is the internal structure of the pyrochlore crystal: a relict core composed of hydrated U-containing pyrochlore (dark gray in BSE), bordered by (Sr – REE) pyrochlore (light gray in BSE), Vishnevogorsk deposit; Buldym complex: ж – crystals of pyrochlore with numerous inclusions of amphibole (fluorichterite) and magnetite from phlogopite-richterite metasomatites, з – REE – Th-pyrochlore in intergrowth with eschinitis from mica metasomatites, Buldym deposit; Am – amphibole, Mt – magnetite, Ti–Hm – titanium–hematite, Ca – calcite, Ap – apatite, Cl – chlorite, Esh – eschinite.

рохлоров и пирохлоров Центральной щелочной полосы являются пустотелые сферы (пузыри) размерностью менее 10 мкм, фиксируемые как во внутренних, так и во внешних частях кристаллов (рис. 2, г). Возможно, это отражает специфику флюидонасыщенности расплава (высокую концентрацию летучих), из которых кристаллизовались пирохлоры, либо это были капли солей, не смешивающихся с карбонатным расплавом.

Пирохлоры поздних карбонатитов (севитов II) Вишневогорского и Потанинского месторождений образуют октаэдрические и кубооктаэрические кристаллы размером 0,05–1,5 см красно-бурого, ярко-красного, желтого и оранжевого цвета (рис. 2, д). Часто встречаются кристаллы сложного внутреннего строения – с реликтовыми ядрами черного цвета,

сложенными гидратированным U-содержащим пирохлором, и обрастаниями новообразованного Sr–REE-содержащего ярко-красного пирохлора, что может быть связано с его образованием при процессах растворения-переотложения ранних генераций пирохлора под воздействием флюида на поздних стадиях рудообразования (рис. 2, е).

В доломит-кальцитовых карбонатитах (севитах III) Булдымского комплекса пирохлор образует красно-бурые кристаллы и зерна размером 0,5–10 см. В ассоциирующих флогопит-рихтеритовых метасоматитах также встречается мелкая вкрапленность желто-бурого пирохлора (метакристаллы?) с многочисленными включениями амфибола (фторрихтерита), рис. 2, ж, а в слюдитах отмечается уранпирохлор (округлые зерна черного цвета с зеленовато-черными каймами размером 0,1–0,5 см) и темно-бурый REE–Th-пирохлор, образующий крупные кристаллы (до 15 см) в срастании кристаллами эшинита -(Ce) (рис. 2, з).

Особенности химизма и эволюция состава пирохлоров

Представительные анализы минералов группы пирохлора Ильмено-Вишневогорского и Булдымского комплексов приведены в таблице. Изменчивость в химическом составе исследованных пирохлоров значительна (в мас. %): Nb_2O_5 – 39,0–69,6; Ta_2O_5 – 0–13,8; ZrO_2 – 0–0,15; TiO_2 – 2,8–12,2; CaO – 2,6–17,2; Na_2O – 0–8,0; ThO_2 – 0–6; UO_2 – 0–23,8; $LREE_2O_3$ – 0–7,3; Fe_2O_3 – 0–1,8; MnO – 0–0,7; BaO – 0–2,3; SrO – 0,1–5,5; PbO – 0–1,0; F – 0–5,7, что характерно для пирохлоров из карбонатитовых массивов мира [10–17].

Согласно последней номенклатуре группы пирохлора (на основе преобладающего катиона или аниона в позициях B = Nb, Ti, Ta; A = Ca, Na, REE, Y, Sr, Ba, Mn, Mg, U, Th и Y =O, OH, F) [18], исследованные пирохлоры могут быть классифицированы как U–(Ta)-содержащие оксикальциопирохлоры (уранпирохлоры, по классификации [19]), а также фторкальциопирохлоры (в том числе Ta-, REE_{Ce}- и Sr-содержащие разновидности). Измененные пирохлоры образуют тренд к гидроксилкальциопирохлорам, кено- и гидропирохлорам. Составы пирохлоров в соответствии с классификациями [18, 19] показаны на рис. 3.

U–(Ta)-содержащие гидроксил- и оксикальциопирохлоры(15–24 мас. % UO_2; 1–14 мас. % Ta_2O_5) встречаются в ранних высокотемпературных карбонатитах и силикокарбонатитах Центральной щелочной полосы (Потанинское месторождение, Увильдинское рудопроявление). Этот тип пирохлоров, вероятно, образуется раньше, чем другие типы пирохлоров, на завершающих стадиях эволюциищелочно-карбонатитовых магм [6].

Ta-содержащие фторкальциопирохлоры (1,5–5,0 мас. % Ta_2O_5; 0–4,2 мас. % UO_2) характерны для нефелиновых пегматитов [7] и установлены в апикальной части Вишневогорского массива (Вишневогорское месторождение, рудная зона 147 и 140), а также в ранних карбонатитах на Потанинском месторождении. Этот пирохлор формируется на пегматитовой стадии кристаллизации щелочного расплава.

Фторкальциопирохлоры с максимальными содержаниями Nb_2O_5 (65–69 мас. %) и низкими содержаниями микропримесей встречаются в миаскитовых пегматоидах и карбонатитах Вишневогорского массива, а также в кальцит-доломитовых карбонатитах Булдымского комплекса. Этими пирохлорами сложены основные рудные зоны Вишневогорского (рудные зоны 140 и 147) и Булдымского месторождений, встречаются они также и на Потанинском месторождении.

Sr- и REE-содержащие фторкальциопирохлоры (3–6 мас. % $LREE_2O_3$; 1,5–4,5 мас. % SrO) формируются в поздних карбонатитах Вишневогорского массива, а также в пироксен-полевошпатовых жилах и карбонатитах экзоконтактового фенитового ореола Вишневогорского массива и Центральной щелочной полосы. Встречаются в виде самостоятельных кристаллов (рис. 2, д), иногда образуют каймы вокруг U-содержащих реликтовых ядер пирохлора (рис. 2, е). *REE–Th-содержащие фторкальциопирохлоры* (3–4,5 мас. % $LREE_2O_3$; 5,9–8,0 мас. % ThO_2) в срастании с эшинитом установлены в слюдистых метасоматитах Булдымского массива. Вероятно, что формирование этих разновидностей пирохлоров про-

Рисунок 3. Составы пирохлоров на треугольных диаграммах, отражающих заполнение B- и A- позиций (форм. ед.) в структуре пирохлора в соответствии с IMA классификациями [18, 19]. IMA (International Mineralogical Association) – Международная минералогическая ассоциация.1–4 –Ильмено-Вишневогорский комплекс: 1 – U–(Ta)-содержащие окси- и гидроксилкальциопирохлоры (севиты I), 2 – (Ta)-содержащие фторкальциопирохлоры (миаскит-пегматиты), 3 – фторкальциопирохлоры (севиты I), 4 – (REE–Sr)-содержащие фторкальциопирохлоры (севиты II); 5–7 –Булдымский комплекс: 5 – U–(Ta)-содержащие гидроксилкальциопирохлоры (слюдиты), 6 – фторкальциопирохлоры (севиты III), 7 – (REE–Th)-содержащие пирохлоры (слюдиты).

Figure 3. Compositions of pyrochlore in triangular diagrams reflecting the filling of B- and A- positions (form units) in the structure of pyrochlore in accordance with IMA classifications [18, 19]. IMA – International Mineralogical Association. 1–4 –Ilmen-Vishnevogorsky complex: 1 – U– (Ta) -containing hydroxy- and hydroxyl-calcium-pyrochlore (Sevites I), 2 – (Ta) -containing fluoro-calcium-pyrochlores (Miaskite-pegmatites), 3 – Fluoro-calcium-pyrochlore, 4 – Sevites (4)–- (REE – Sr) – containing fluoro-calcium-pyrochlore (Sevita II); 5–7 – Buldym complex: 5 – U – (Ta) – containing hydroxylcalciopyrochlore (micas), 6 – fluorocalciopyrochlors (sevite III), 7 – (REE – Th) – containing pyrochlores (micaceous).

исходит на завершающих стадиях (позднекарбонатитовой) эволюции комплекса, а также может быть связано с этапом метаморфических преобразований коллизионной стадии.

Составы пирохлоров из различных типов пород Ильмено-Вишневогорского и Булдымского комплексов приведены на бинарной диаграмме Nb–F, иллюстрирующей последовательность формирования рудных минералов и закономерности их геохимической эволюции (рис. 4).

Тренд I (раннекарбонатитовый тренд) иллюстрирует последовательное изменение составов уранпирохлора (или U–(Ta)-содержащего оксикальциопирохлора по [18]) с увеличением F и Nb, после чего происходит резкая смена составов кристаллизующихся рудных минералов и начинают кристаллизоваться фторкальциопирохлоры, формирующие *тренд II (позднекарбонатитовый тренд)*, который фиксирует резкую смену условий и химизма среды минералообразования. *Тренд III* отражает процессы *вторичных изменений пирохлоров*, связанных с воздействием водного флюида, в результате которых происходит вынос Na, Ca и F из структуры пирохлоров, появление вакансий в A-позиции, которая частично заполняется Si, Fe, Ta, Ti, Th, REE и Sr с формированием составов гидроксил-, кено- и гидропирохлоров.

Необходимо отметить, что химические составы изученных нами уранпирохлоров из ранних карбонатитов Ильмено-Вишневогорского и Булдымского комплексов типичны для самых ранних генераций уранпирохлора, которые описаны в карбонатитовых комплексах Карело-Кольской провинции [10, 13] и образуются на фоскоритовой (позднемагматической) стадии эволюции этих карбонатитовых комплексов (рис. 4).Также можно отметить близость составов пирохлоров миаскит-пегматитов Ильмено-Вишневогорского комплекса и пирохлоров из фоскоритов Хибин. Эти данные в совокупности с геологическими и петрографическими наблюдениями подтверждают, что U–(Ta)-содержащие разновидности пирохлоров уральских карбонатитовых комплексов образовались на позднемагматической стадии кристаллизации щелочно-карбонатитовых расплавов.

Пирохлоры поздних карбонатитов и метасоматитов Ильмено-Вишневогорского и Булдымского комплексов показывают широкие вариации составов и формируют единый линейный тренд с увеличением F при менее значительных изменениях содержания Nb (рис. 4). Необходимо отметить, что составы изученных пирохлоров отличны от ранних (первичных) пирохлоров фоскоритов и карбонатитов Карело-Кольской провинции, что может быть связано с иными условиями их формирования на постколлизионном этапе развития Уральской складчатой области.

Таким образом, геохимические данные, полученные нами для U–(Ta)-содержащих пирохлоров Ильмено-Вишневогорского и Булдымского комплексов типичны для позднемагматических (фоскоритовых) стадий эволюции карбонатитовых комплексов [10, 13]; это в совокупности с геологическими и петрографическими наблюдениями подтверждает, что U–(Ta)-пирохлоры уральских карбонатитовых комплексов образовались на позднемагматической стадии кристаллизации щелочно-карбонатитовых расплавов. Пирохлоры поздних карбонатитов (севитов II и севитов III), а также миа-

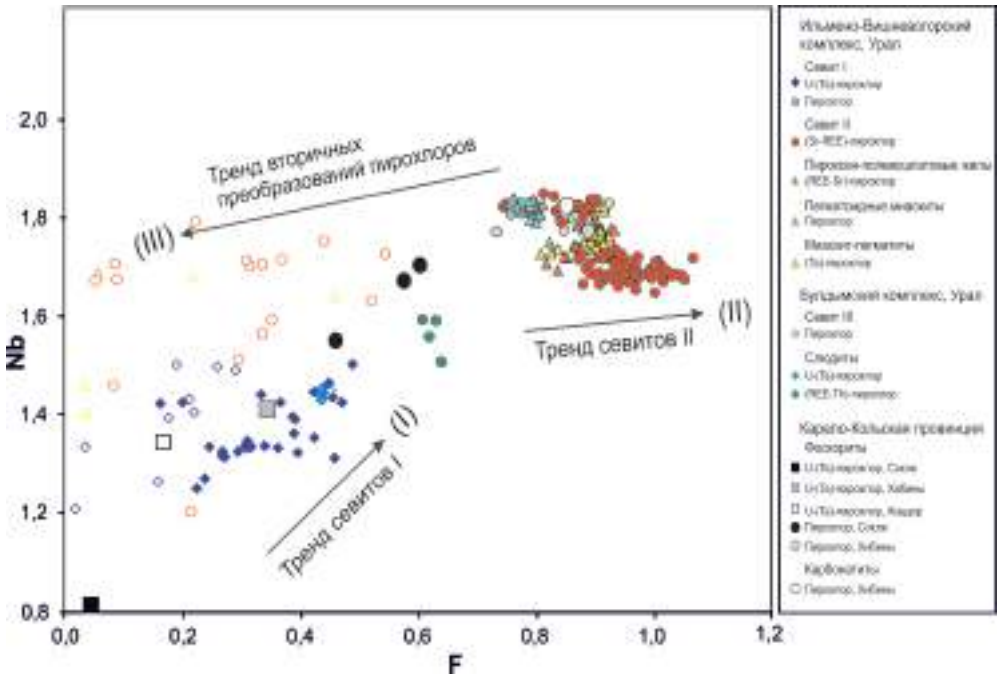


Рисунок 4. Бинарная диаграмма состава Nb–F (форм. ед.) минералов группы пирохлора из пород Ильмено-Вишневогорского и Булдымского карбонатитовых комплексов, Южный Урал. Стрелки показывают направление эволюции состава пирохлоров: I – раннекарбонатитовый тренд, II – позднекарбонатитовый тренд, III – тренд низкотемпературных изменений (гидратации) с образованием составов кено- и гидропирохлоров. Не залитые условные знаки – измененный (гидратированный) пирохлор; тренд I соответствуют кристаллизации уранпирохлоров (Потанинское и Булдымское месторождения); тренд II – кристаллизация фторкальциопирохлоров (Вишневогорское, Булдымское, Потанинское месторождения); для сравнения также показаны точки состава пирохлоров из пород платформенных ультраосновных щелочных карбонатитовых комплексов Карело-Кольской провинции [10, 13].

Figure 4. A binary composition of the diagram of Nb – F (units) of minerals of the pyrochlore group from rocks of the Ilmeno-Vishnevogorsk and Buldym carbonatite complexes, South Ural. Arrows indicate the direction of evolution of the composition of pyrochlore: I – early carbonate trend, II – late carbonate trend, III – trend of low-temperature changes (hydration) with the formation of keno- and hydro-pyrochlore compositions. Not filled in conventional signs – altered (hydrated) pyrochlore; Trend I corresponds to the crystallization of uranpirochlorine (Potaninskoye and Buldym deposits) Trend II – crystallization of fluoro-calcium-pyrochlore (Vishnevogorsk, Buldym, Potaninsk deposits); for comparison, pyrochlore composition points from the rocks of platform ultrabasic alkaline carbonatite complexes of the Karelian-Kola province are also shown [10, 13].

скит-пегматитов и пироксен-полевошпатовых жил Ильмено-Вишневогорского и Булдымского комплексов показывают широкие вариации составов (от стехиометричных пирохлоров с низкими содержаниями микропримесей до Ta-, REE- и Sr-содержащих разностей пирохлоров) и формируют линейный тренд с увеличением Na и F (рис. 4), свидетельствующий о резкой смене условий процессов кристаллизации и возможном перерыве в рудообразовании.

Необходимо отметить, что U–Pb-датирование пирохлоров подтверждает многоэтапность формировании Nb-руд месторождений Ильмено-Вишневогорского и Булдымского карбонатитовых комплексов [20, 21]. Так, U–Pb-возраст U–(Ta)-пирохлоров Потанинского месторождения (378 ± 4,9 млн лет) может быть соотнесен с завершающей стадией функционирования щелочно-карбонатитовой магматической системы [20, 22–25]. U–Pb-возраст фторкальциопирохлоров Вишневогорского и Булдымского месторождений (230 ± 1,5 и 235 ± 6 млн лет соответственно), а также Потанинского месторождения (217,2 ± 1,9 млн лет) [20] фиксирует новый этап рудообразования и, вероятно, связанный с постколлизионным этапом развития Уральской складчатой области [26, 27].

Заключение

В результате проведенных исследований рудных минералов группы пирохлора карбонатитовых комплексов Урала установлены несколько минеральных видов группы пирохлора, формирование которых связано с определенными эволюционными стадиями функционирования щелочно-карбонатитовой магматической системы и вторичными преобразованиями. Согласно [18], исследованные пирохлоры могут быть классифицированы как фторкальциопирохлоры (в том числе Ta-, REE_{Ce}- и Sr-содержащие разновидности) и U–(Ta)-оксикальциопирохлоры (уранпирохлоры, по классификации [20]). Среди измененных разностей пирохлоров установлены составы гидроксилкальциопирохлоров, кенопирохлоров и гидропирохлоров.

U–(Ta)-оксикальциопирохлоры образовались на позднемагматической (раннекарбонатитовой) стадии эволюции щелочно-карбонатитовых расплавов; фторкальциопирохлоры (в том числе Ta-содержащие разности) формируются на пегматитовой и ранней карбонатитовой стадии кристаллизации. Образование Sr–REE-содержащих фторкальциопирохлоров происходит на завершающей (позднекарбонатитовой) стадии эволюции комплекса, а также может быть связано с этапом метаморфических преобразований постколлизионной стадии. Вторичные изменения пирохлоров, связанные с воздействием водного флюида, приводят к формированию составов гидроксилкальциопирохлоров, кено- и гидропирохлоров. Закономерности эволюции химизма пирохлоров – последовательное изменение составов уранпирохлора с увеличением F и Nb (раннекарбонатитовый тренд) и резкая смена состава кристаллизующихся фторкальциопирохлоров (позднекарбонатитовый тренд) – фиксирует резкую смену условий и химизма среды минералообразования.

Рассмотренные особенности морфологии, состава и геохимической эволюции рудных минералов группы пирохлора редкометалльных карбонатитовых месторождений Урала свидетельствуют о двухэтапном процессе рудообразования. На первом этапе, связанном с заключительными стадиями эволюции щелочно-карбонатитовой магматической системы, в силикокарбонатитах (ранних карбонатитах) была сформирована U–(Ta)-пирохлоровая минерализация. На втором этапе, связанном с метасоматическими или метаморфическими преобразованиями пород карбонатитовых комплексов, на постколлизионной стадии развития Уральской складчатой области происходили масштабные процессы растворения, переотложения рудных минералов первого этапа и формировались пирохлоры нового поколения.

Авторы выражают глубокую признательность первооткрывателю редкометалльных месторождений карбонатитовых комплексов Урала В. Я. Левину за предоставленные коллекции редкометалльных минералов для исследований, а также своим коллегам В. В Шарыгину и Д. В. Замятину за проведение аналитических работ.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17–05–00154 и темы государственного задания ИГГ УрО РАН № АААА-А18_118052590028-9.

ЛИТЕРАТУРА

1. Багдасаров Ю. А. О некоторых условиях образования карбонатитов линейно-трещинного типа // Литосфера. 2014. № 4. С. 113–119.
2. Бонштедт-Куплетская Э. М. Минералогия щелочных пегматитов Вишневых гор. М.: АН СССР, 1951. 176 с.
3. Еськова Е. М., Назаренко И. И. Пирохлор Вишневых гор, его парагенетические ассоциации и особенности химического состава // Труды ИМГРЭ. 1960. № 4. С. 33–50.
4. Еськова Е. М., Жабин А. Г., Мухитдинов Г. Н. Минералогия и геохимия редких элементов Вишневых гор. М.: Наука, 1964. 319 с.
5. Ефимов А. Ф., Лебедева С. И., Левин В. Я. Типохимизм акцессорного пирохлора в породах щелочного комплекса Урала // Геохимия. 1985. № 2. С. 201–208.
6. Левин В. Я., Роненсон Б. М., Самков В. С. И др. Щелочно-карбонатитовые комплексы Урала. Екатеринбург: Уралгеолком,1997. 274 с.
7. Попова В. И., Попов В. А., Блинов И. А., Котляров В. А. Новые данные о пирохлорах щелочных пегматитов и рудных зон Вишнёвых гор (Южный Урал) // Минералогия. 2018. № 4(3). С. 46–50.
8. Nedosekova I. L., Belousova E. A., Sharygin V. V., Belyatsky B. V., Baynova T. B. Origin and evolution of the Ilmeny-Vishnevogorsky carbonatites (Urals, Russia): insights from trace-element compositions, and Rb–Sr, Sm–Nd, U–Pb, Lu-Hf isotope data // Mineralogy and Petrology, 2013. Vol. 107, issue 1. P. 101–123. https://doi.org/10.1007/s00710-012-0223-9
9. Поляков В. О., Недосекова И. Л. Минералогия апогипербазитовых фенитов и карбонатитов южной части Ильменских гор // Минералы месторождений и зон техногенеза рудных районов Урала. Свердловск: УрО АН СССР, 1990. С. 24–35.
10. Chakhmouradian A. R. Williams C. T. Mineralogy of high field strength elements (Ti, Nb, Zr, Ta, Hf) in phoscoritic and carbonatitic rocks of the Kola Peninsula, Russia // Phoscorites and Carbonatites from mantle to mine: the key Example of the Kola Alkaline Province. 2004. P. 293–340. https://doi.org/10.1180/MSS.10.9
11. Ярошевский А. А., Багдасаров Ю. А. Геохимическое разнообразие минералов группы пирохлора // Геохимия. 2008. № 12. С. 1322–1345. https://doi.org/10.1134/S0016702908120045
12. Когарко Л. Н., Сорохтина Н. В., Зайцев В. А., Сенин В. Г. Редкометалльная минерализация кальцитовых карбонатитов архипелага Капа Верде // Геохимия. 2009. № 6. С. 463–581. https://doi.org/10.1134/S0016702909060019
13. Зайцев А. Н., Вильямс Ч. Т., Уолл Ф., Золотарев А. А. Эволюция химического состава минералов группы пирохлора из фоскоритов и карбонатитов Хибинского щелочного массива // ЗВМО. 2011. Ч. CXXXX. № 3. С. 40–55.
14. Лазарева Е. В., Жмодик С. М., Добрецов Н. Л., Толстов А. В., Щербов Б. Л., Карманов Н. С., Герасимов Е. Ю., Брянская А. В. Главные рудообразующие минералы аномально богатых руд месторождения Томтор (Арктическая Сибирь) // Геология и геофизика. 2015. Т. 56, № 6. С. 1080–1115. https://doi.org/10.15372/GiG20150603

15. Khromova E. A., Doroshkevich A. G., Sharygin V. V., Izbrodin L. A. Compositional Evolution of Pyrochlore-Group Minerals in Carbonatites of the Belaya Zima Pluton, Eastern Sayan // Geol. Ore Deposits. 2017. Vol. 59, № 8. P. 752–764. https://doi.org/10.1134/S1075701517080037
16. Karup-Møller S. Uranium-rich pyrochlores from the Ímaussaq complex, South Greenland // Neues Jahrbuch fur Mineralogie. 2018. Vol. 195, issue 3. P. 177–190. https://doi.org/10.1127/njma/2018/0114
17. Walter B. F., Parsapoor A., Braunger S., Marks M. A. W., Wenzel T., Martin M., Markl G. Pyrochlore as a monitor for magmatic and hydrothermal processes in carbonatites from the Kaiserstuhl volcanic complex (SW Germany) // Chemical Geology. 2018. Vol. 498. P. 1–16. https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2018.08.008
18. Atencio D., Andrade M.B., Christy A.G., Giere R., Kartashov P.M. The pyrochlore supergroup of minerals: nomenclature // The Canadian Mineralogist. 2010. Vol. 48. P. 673–698. https://doi.org/10.3749/canmin.48.3.673
19. Hogarth D. D. Classification and nomenclature of the pyrochlore group // American Mineralogist. 1977. Vol. 62. P. 403–410.
20. Недосекова И. Л., Коротеев В. А., Беляцкий Б. В., Шарыгин В. В, Лепехина Е. Н., Прибавкин С. В. U–Pb-датирование рудных ниобиевых минералов группы пирохлора (Ильмено-Вишневогорский карбонатит-миаскитовый комплекс, Южный Урал) // Литосфера. 2018. Т. 18, № 5. С. 758–773. https://doi.org/10.24930/1681-9004-2018-18-5-758-773
21. Беляцкий Б. В., Лепехина Е. Н., Антонов А. В., Родионов Н. В., Недосекова И. Л., Петров О. В., Шевченко С. С., Сергеев С. А. О возрасте Nb-редкометального оруденения Ильмено-Вишневогорского щелочного комплекса (Южный Урал) // ДАН. 2018. Т. 481, № 6. С. 67–73. https://doi.org/10.1134/S1028334X18080251
22. Краснобаев А. А., Русин А. И., Вализер П. М., Бушарина С. В. Цирконология кальцитовых карбонатитов Вишневогорского массива (Южный Урал) // ДАН. 2010. Т. 431, № 3. С. 1–4. https://doi.org/10.1134/S1028334X10030268
23. Краснобаев А. А., Вализер П. М., Русин А. И., Бушарина С. В., Медведева Е. В. Цирконология гипербазитов Булдымского массива (Ильмено-Вишневогорский комплекс, Южный Урал) // ДАН. 2015. Т. 461, №. 1. С. 63–69. https://doi.org/10.1134/S1028334X15030022
24. Краснобаев А. А., Вализер П. М., Бушарина С. В., Медведева Е. В. Цирконология миаскитов Ильменских гор (Южный Урал) // Геохимия. 2016. № 9. С. 797–813. https://doi.org/10.1134/S0016702916070041
25. Иванов К. С., Вализер П. М., Ерохин Ю. В., Погромская О. Е. О генезисе карбонатитов складчатых поясов (на примере Урала) // ДАН. 2010. Т. 435, № 2. С. 1–5. https://doi.org/10.1134/S1028334X10110036
26. Пучков В. Н. Геология Урала и Приуралья (актуальные вопросы стратиграфии, тектоники, геодинамики и металлогении). Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2010. 280 с.
27. Иванов К. С., Конторович В. А., Пучков В. Н., Федоров Ю. Н., Ерохин Ю. В. Тектоника Урала и фундамента Западной Сибири: основные черты геологического строения и развития // Региональная геология. 2014. № 2. С. 22–35.
28. Жданов В. А. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000. Уральская серия, лист О-41 (Екатеринбург): объяснит. записка. СПб.: ВСЕГЕИ, 2009. 349 с.

Статья принята в редакцию 28 февраля 2019 г.

УДК 553.493+552.3 https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-3-46-57

Ore niobium minerals of the pyrochlore group of carbonates of the Urals: compositional features and geochemical evolution

Irina Leonidovna NEDOSEKOVA*,
Sergey Vladimirovich PRIBAVKIN**

Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russia

Relevance of research is determined by the wide development of linear type carbonatite complexes in folded areas, their weaker knowledge compared to platform carbonatite complexes, including the ore potential. The genesis of Zr – Nb – REE mineralization, the ratio of ore mineralization with magmatic interstitial phases and metamorphism processes remain topical issues, as well as the duration of the formation of rare-metal deposits in linear carbonatite complexes of folded areas.
Purpose of research – development of the problem of rare metal ore formation in linear carbonatite complexes of folded areas using the Urals as an example, including the characterization of ore minerals of the pyrochlore group, their composition, and geochemical evolution.
Results of research. The features of the composition and geochemical evolution of niobium ore minerals of the pyrochlore group from the main types of rare-metal deposits associated with alkaline-carbonatite complexes of the Urals are studied. The pyrochlors of the Vishne-Vogorsky and Potaninsky deposits of niobium, ore occurrences of Uvilda and Purgino (Ilmeno-Vishnevogorsky miaskite-carbonatite complex), as well as the Buldymsky REE – Nb deposits (Buldymsky ultrabasite-carbonatite complex), and the Southern Urals were studied. Several mineral types of pyrochlore have been identified — hydroxyl- and oxycalciopyrochlor chlorine U (Ta)-containing, fluoro-calcium-pyrochlor (including Ta- and Sr – REE-containing varieties), hydroxyl-calcium-pyrochlor, keno- and hydro-pyrochlor, the formation of which is associated with certain evolutionary stages of the functioning of alkaline magma systems and secondary transformations of pyrochlore. The regularities of the evolution of the chemistry of pyrochlore — a successive change in the composition of uranpirochlore with an increase in F and Nb (early carbonate trend) and a sharp change in the composition of crystallizing fluoro-calcium-pyrochlore chlorides (late carbonate trend) – record a sharp change in the conditions and chemistry of the mineral formation environment.
Conclusions. Studies of niobium ore minerals of the pyrochlore group of rare-metal deposits associated with linear carbonatite complexes of the Urals indicate that ore deposits were formed as a result of two stages of ore formation.

Keywords: pyrochlore, niobium deposits, linear carbonatite complexes, the Urals.

This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research grant No. 17–05–00154 and the topic of the state assignment of the IGG UB RAS No. AAAA-A18_118052590028-9.

REFERENCES

1. Bagdasarov Yu. A. 2014, On some conditions for the formation of linear-fractured carbonatites. *Litosfera* [Lithosphere], no. 4, pp. 113–119. (*In Russ.*)
2. Bonshtedt-Kupletskaya E. M. 1951, *Mineralogiya shchelochnykh pegmatitov Vishnevykh gor* [Mineralogy of alkaline pegmatites of the Vishnevaya mountain]. Moscow, 176 p.
3. Eskova E. M., Nazarenko I. I. 1960, *Pirokhlor Vishnevykh gor, yego parageneticheskiye assotsiatsii i osobennosti khimicheskogo sostava* [Pirochlor of the Vishnevaya mountain, its paragenetic associations and chemical composition features]. Proceedings of the Institute of Mineralogy, Geochemistry and Crystal Chemistry of Rare Elements, no. 4, pp. 33–50.
4. Yes'kova Ye. M., Zhabin A. G., Mukhitdinov G. N. 1964, *Mineralogiya i geokhimiya redkikh elementov Vishnevykh gor* [Mineralogy and geochemistry of rare elements of the Vishnevaya mountain]. Moscow, 319 p.
5. Efimov A.F., Lebedeva S.I., Levin V. Ya. 1985, Typochemism of accessory pyrochlore in the rocks of the alkaline complex of the Urals. *Geokhimiya* [Geochemistry], no. 2, pp. 201–208. (*In Russ.*)
6. Levin V. Ya., Ronenson B. M., Samkov V. S. et al. 1997*, Shchelochno-karbonatitovyye kompleksy Urala* [Alkaline-carbonatite complexes of the Urals]. Ekaterinburg, 274 p.
7. Popova V. I., Popov V. A., Blinov I. A., Kotlyarov V. A. 2018, New data on pyrochlors of alkaline pegmatites and ore zones of the Vishnevaya mountain (South Ural). *Mineralogiya* [Mineralogy], no. 4(3), pp. 46–50. (*In Russ.*)
8. Nedosekova I. L., Belousova E. A., Sharygin V. V., Belyatsky B. V., Baynova T. B. 2013, Origin and evolution of the Ilmeny-Vishnevogorsky carbonatites (Urals, Russia): insights from trace-element compositions, and Rb–Sr, Sm–Nd, U–Pb, Lu-Hf isotope data. *Mineralogy and Petrology*, vol. 107, issue 1, pp. 101–123. https://doi.org/10.1007/s00710-012-0223-9
9. Polyakov V. O., Nedosekova I. L. 1990, *Mineralogiya apogiperbazitovykh fenitov i karbonatitov yuzhnoy chasti Il'menskikh gor* [Mineralogy of apohyperbasite fenites and carbonatites of the southern part of the Ilmensky mountains]. Minerals of deposits and technogenesis zones of ore regions of the Urals. Sverdlovsk, pp. 24–35.
10. Chakhmouradian A. R. Williams C. T. 2004, Mineralogy of high field strength elements (Ti, Nb, Zr, Ta, Hf) in phoscoritic and carbonatitic rocks of the Kola Peninsula, Russia. Phoscorites and Carbonatites from mantle to mine: the key Example of the Kola Alkaline Province, pp. 293–340. https://doi.org/10.1180/MSS.10.9
11. Yaroshevsky A. A., Bagdasarov Yu. A. 2008, Geochemical diversity of minerals of the pyrochlore group. *Geokhimiya* [Geochemistry], no. 12, pp. 1322–1345. (*In Russ.*) https://doi.org/10.1134/S0016702908120045
12. Kogarko L. N., Sorokhtina N. V., Zaitsev V. A., Senin V. G. 2009, Rare metal mineralization of calcite carbonatites of the Capa Verde archipelago. *Geokhimiya* [Geochemistry], no. 6, pp. 463–581. (*In Russ.*) https://doi.org/10.1134/S0016702909060019
13. Zaitsev A. N., Williams Ch. T., Wall F., Zolotarev A. A. 2011, Evolution of the chemical composition of the minerals of the pyrochlore group from phosphorites and carbonatites of the Khibiny alkaline massif. *Zapiski Rossiiskogo Mineralogicheskogo Obshchestva* [Proceedings of the Russian Mineralogical Society], p. CXXXX, no. 3, pp. 40–55. (*In Russ.*)
14. Lazareva E. V., Zhmodik S. M., Dobretsov N. L., Tolstov A. V., Scherbov B. L., Karmanov N. S., Gerasimov E. Yu., Bryanskaya A. V. 2015, Main ore-forming minerals abnormally rich ores of the Tomtor deposit (Arctic Siberia). *Geologiya i geofizika* [Geology and geophysics], vol. 56, no. 6, pp. 1080–1115. (*In Russ.*) https://doi.org/10.15372/GiG20150603
15. Khromova E. A., Doroshkevich A. G., Sharygin V. V., Izbrodin L. A. 2017, Compositional Evolution of Pyrochlore-Group Minerals in Carbon-

* vladi49@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0001-7952-0639
**pribavkins@gmail.com

atites of the Belaya Zima Pluton, Eastern Sayan. *Geol. Ore Deposits*, vol. 59, no. 8, pp. 752–764. https://doi.org/10.1134/S1075701517080037
16. Karup-Møller S. 2018, Uranium-rich pyrochlores from the Ímaussaq complex, South Greenland. *Neues Jahrbuch fur Mineralogie*, vol. 195, issue 3, pp. 177–190. https://doi.org/10.1127/njma/2018/0114
17. Walter B. F., Parsapoor A., Braunger S., Marks M. A. W., Wenzel T., Martin M., Markl G. 2018, Pyrochlore as a monitor for magmatic and hydrothermal processes in carbonatites from the Kaiserstuhl volcanic complex (SW Germany). *Chemical Geology*, vol. 498, pp. 1–16. https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2018.08.008
18. Atencio D., Andrade M.B., Christy A.G., Giere R., Kartashov P.M. 2010, The pyrochlore supergroup of minerals: nomenclature. *The Canadian Mineralogist*, vol. 48, pp. 673–698. https://doi.org/10.3749/canmin.48.3.673
19. Hogarth D. D. 1977, Classification and nomenclature of the pyrochlore group. A*merican Mineralogist*, vol. 62, pp. 403–410.
20. Nedosekova I. L., Koroteev V. A., Belyatsky B. V., Sharygin V. V., Lepekhina E. N., Pribavkin S. V. 2018, U–Pb dating of ore niobium minerals of the pyrochlore group (Ilmeno-Vishnevogorsk carbonatite miaskitovy complex, South Ural). *Litosfera* [Lithosphere], vol. 18, no. 5, pp. 758–773. (*In Russ.*) https://doi.org/10.24930/1681-9004-2018-18-5-758-773
21. Belyatsky B. V., Lepekhina E. N., Antonov A. V., Rodionov N. V., Nedosekova I. L., Petrov O. V., Shevchenko S. S., Sergeev S. A. 2018, About the age of Nb mineralization of the Ilmeno-Vishnevogorsk alkaline complex (Southern Urals). *Doklady Akademii nauk* [Proceedings of the USSR Academy of Sciences], vol. 481, no. 6, pp. 67–73. (*In Russ.*) https://doi.org/10.1134/S1028334X18080251
22. Krasnobaev A. A., Rusin A.I ., Valizer P. M., Busharina S. V. 2010, Zirconology of calcite carbonatites of the Vishnevogorsky massif (Southern Urals). *Doklady Akademii nauk* [Proceedings of the USSR Academy of Sciences]. Vol. 431, no. 3, pp. 1–4. (*In Russ.*) https://doi.org/10.1134/S1028334X10030268
23. Krasnobaev A. A., Valizer P. M., Rusin A. I., Busharina S. V., Medvedeva E. V. 2015, Zirconology of hyperbasites of the Buldym massif (Ilmeno-Vishnevogorsky complex, Southern Urals). *Doklady Akademii nauk* [Proceedings of the USSR Academy of Sciences], vol. 461, no. 1, pp. 63–69. (*In Russ.*) https://doi.org/10.1134/S1028334X15030022
24. Krasnobaev A. A., Valizer P. M., Busharina S. V., Medvedeva E. V. 2016, Zirconology of miaskites of the Ilmen mountains (Southern Urals). *Geokhimiya* [Geochemistry], no. 9, pp. 797–813. (*In Russ.*) https://doi.org/10.1134/S0016702916070041
25. Ivanov K. S., Valizer P. M., Erokhin Yu. V., Pogromskaya O. E. 2010, On the genesis of folded belt carbonatites (using the Urals as an example). *Doklady Akademii nauk* [Proceedings of the USSR Academy of Sciences], vol. 435, no. 2. P. 1–5. (*In Russ.*) https://doi.org/10.1134/S1028334X10110036
26. Puchkov V. N. 2010, *Geologiya Urala i Priural'ya* [Geology of the Urals and the Transurals region], topical issues of stratigraphy, tectonics, geodynamics and metallogeny. Ufa, 280 p.
27. Ivanov K. S., Kontorovich V. A., Puchkov V. N., Fedorov Yu. N., Erokhin Yu. V. 2014, Tectonics of the Urals and the foundations of Western Siberia: the main features of the geological structure and development. *Regional'naya geologiya* [Regional geology], no. 2, pp. 22–35. (*In Russ.*)
28. Zhdanov V. A. 2009, State geological map of the Russian Federation. Scale 1: 1,000,000, 349 p.

The article was received on May 10, 2019

УДК 553.4 https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-3-58-62

Техногенные месторождения: особенности исследований

Анатолий Борисович МАКАРОВ*,
Гульнара Габдулбариевна ХАСАНОВА**,
Александр Григорьевич ТАЛАЛАЙ***

Уральский государственный горный университет, Россия, Екатеринбург

Актуальность работы. Техногенные месторождения, сформированные в последние десятилетия, образуют новый вид месторождений и к настоящему времени приобретают особое значение, однако методические обобщения по их геологическим исследованиям пока еще выполняются в незначительной мере. Весьма актуальным представляется на основе ранее выполненных исследований обобщение применяемых методов и способов при проведении геологоразведочных работ в пределах техногенных месторождений.
Цель работы. Изучение особенностей геологических исследований техногенных месторождений, выполненных в последние годы; определение важнейших методов для изучения их геологического строения и вещественного состава техногенного минерального сырья.
Методология исследований. В работе проведен анализ результатов выполненных ранее геологических исследований техногенных месторождений, их классификаций, геолого-промышленных типов для определения основных особенностей методики их изучения.
Результаты работы. Рассмотрены главные геолого-промышленные типы техногенных месторождений, методические подходы к их изучению и оценке. На примере изучения отдельных групп и классов техногенных месторождений показан комплекс методов, применяемых для геологических исследований этих объектов.
Выводы. Определены главные особенности геологических исследований техногенных месторождений различных геолого-промышленных типов. Показано, что геологические исследования должны быть комплексными, важнейшим направлением являются геоэкологические исследования. С учетом разнообразного состава слагающих их образований особое внимание необходимо уделять выбору аналитических исследований с широким использованием ядерно-физических методов, в том числе при проведении геоэкологических исследований. На стадии разведочных работ наряду с традиционными методами при оценке запасов рекомендуется применение компьютерных 3D-технологий.

Ключевые слова: техногенные месторождения, геолого-промышленные типы, комплексная оценка, геоэкологические исследования.

Введение

Техногенные месторождения, основная масса которых была сформирована в последние десятилетия, к настоящему времени приобретают особое значение. Так, цели и задачи стратегии развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации до 2035 г. предусматривают «создание условий для освоения техногенных месторождений, извлечения ценных компонентов из вскрышных, вмещающих пород, а также попутных промышленных вод». Необходимость переработки техногенно-минерального сырья определяется также «Стратегией развития промышленности России по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 года». Актуальность и необходимость геологических исследований для изучения подобных объектов в значительной мере определяется необходимостью оценки их современного экологического состояния, что, в свою очередь, связано с тем, что техногенные образования, во многих случаях содержащие сульфиды цветных металлов, могут существенно видоизменяться, теряя при этом технологические свойства и практическую ценность. В то же время освоение техногенных месторождений может способствовать увеличению минерально-сырьевой базы и привести к улучшению экологической ситуации, в частности в регионах горнодобывающих предприятий.

Техногенные месторождения и направления использования техногенного сырья

Изучению техногенных месторождений в различных регионах России уделяется большое внимание. В последние годы выполнен большой объем самых разнообразных исследований их вещественного состава [1–3], особенностей оценки [4–7], определены технологии переработки техногенно-минерального сырья [8–11].

Современная классификация техногенных месторождений [12–14] и техногенно-минеральных образований подразделяет их по условиям образования на две группы: сформировавшиеся в низкотемпературных условиях и в условиях высокотемпературных, что определяет, в совокупности с последующими поверхностными изменениями, их вещественный состав. Основное последующее подразделение техногенных месторождений производится на ряд типов, учитывающих главные процессы их формирования: добычу полезных ископаемых и их обогащение, металлургический передел, химическое и энергетическое производство. Как следствие, условия формирования техногенных месторождений, связанных с самыми разнообразными процессами, определяют и разнообразие вещественного состава и направлений их использования, в то же время – комплексность их изучения для наиболее эффективной последующей переработки.

Предпочтительным направлением использования техногенно-минерального сырья горнодобывающей промышленности является его использование в строительной индустрии с учетом, что вскрышные, вмещающие породы и отходы сухой переработки руд незначительно отличаются от природных строительных материалов. Особое внимание здесь привлекают специальные отвалы убогих, некондиционных руд, которые с течением времени могут быть переработаны с целью извлечения как рудных, так и нерудных (барит, полевой шпат и др.) полезных компонентов.

Существенные особенности вещественного состава имеют техногенно-минеральные образования, формирующиеся в условиях металлургического, топливно-энергетического и химического производства. Металлургические шлаки и шламы образуют широкий спектр техногенно-минеральных образований, их особенности определяются специализацией производства черной (доменные, мартеновские шлаки, шлаки ферросплавного производства) и цветной (мас-

* fgg.gpr@m.ursmu.ru
https://orcid.org/0000-0003-4843-3422
** fgg.gpr@m.ursmu.ru
*** talalay@ursmu.ru

сивные и гранулированные медеплавильные шлаки, шлаки никелевого производства и т. д.) металлургии. Техногенные образования химического производства представлены красными шламами, пиритными огарками, фосфо- и фторогипсами, отличающимися специфическим вещественным составом. Значительное количество технологий по использованию в различных направлениях имеется и для отходов энергетического производства – золошлаков, зол тепловых электростанций.

В настоящее время большое внимание уделяется использованию техногенных образований черной металлургии, традиционное их использование для производства строительных материалов [8, 9] меняется на комплексную переработку с извлечением металлической составляющей для последующего направления ее в доменный процесс. В цветной металлургии медеплавильные шлаки перерабатываются с получением медного концентрата.

Использование техногенно-минерального сырья энергетического и химического производства пока имеет небольшие масштабы. Эти образования значительно отличаются от природного сырья и при наличии различных технологий переработки имеют пока весьма небольшое практическое применение.

Разнообразный вещественный состав техногенно-минеральных образований предполагает широкий спектр их геологических исследований, в том числе и экспериментально-аналитического арсенала, применяемого различными отраслями геологии (технической минералогией и петрографией, геофизикой, геохимией и др.), включая минералого-петрографические, геофизические методы, гидрогеологические и инженерно-геологические исследования с применением современных аналитических и минералогических [15] методов. Комплекс исследований техногенных образований должен включать и необходимые геоэкологические исследования для определения характера и масштаба их воздействия на природную окружающую среду.

Геолого-промышленные типы техногенных месторождений

Наличие результатов многочисленных исследований техногенных месторождений, их вещественного состава и строения, а также определенной методической базы [2, 9, 16], включающей кадастровый учет объектов [17], обобщение опыта их изучения в последние годы позволяют с определенной долей вероятности перейти к выделению уже геолого-промышленных типов техногенных месторождений. Ранее в классификации техногенных месторождений [14] была обоснована их классификация на основе принципов формирования и проектирования разработки. В [9] промышленные типы техногенных месторождений выделены по способу образования: сухие отвалы, гидроотвалы, хвосто- и шламохранилища, комбинированные отвалы, т. е. рассмотрены преимущественно техногенные образования горнодобывающей промышленности, без учета гораздо большего количества техногенных месторождений, сформированных предприятиями других отраслей. Предложенное ранее [12] выделение промышленных типов техногенных месторождений черных, цветных и благородных металлов основано на их генетической классификации. Так, для предприятий медной отрасли цветной металлургии выделены следующие геолого-промышленные типы: 1) отвалы, связанные с добычей медных руд; 2) хвостохранилища обогатительного производства; 3) отвалы металлургического передела. Важнейшим геолого-промышленным типом, представляющим в настоящее время особый интерес, являются отвалы металлургических шлаков, расположенные в пределах таких крупных предприятий, как Среднеуральский медеплавильный завод и Карабашский медеплавильный комбинат. Содержание полезных компонентов в шлаках медной отрасли цветной металлургии показано в таблице.

Помимо указанных техногенных месторождений меди, возможны и второстепенные источники ее получения: пиритные огарки (содержание меди – 0,2–0,43 %) и даже грунты территорий промышленных предприятий, содержащие цветные металлы в виде металлических частиц, шлаков и в глинистых минералах и органике в сорбированном виде.

Выделение определенных геолого-промышленных типов для каждого вида техногенно-минерального сырья, их многообразие в вещественном составе и направлениях использования предопределяет необходимость их комплексной геолого-экономической оценки.

Методология исследований

Геологические исследования техногенных месторождений регламентируются в настоящее время методиками руководства по изучению и эколого-экономической оценке техногенных месторождений (утв. ГКЗ 25.02.1994), однако определенные особенности их вещественного состава предполагают определенные различия в оценке техногенных месторождений. Они базируются на использовании широкого арсенала методов, применяемых в различных отраслях геологии (технической минералогии и петрографии, геохимии, геофизике и др.), т. е. подобные исследования требуют многомерного комплексного подхода к изучаемому объекту, особенно при изучении вещественного состава техногенных образований и выявлении уровня экологического неблагополучия. Особенности исследований техногенных месторождений рационально подразделяются в пределах двух последовательных этапов. В рамках первого этапа исследований необходима кадастровая оценка объектов, определяющая выбор объектов для первоочередной оценки, в том числе необходимо учитывать и потребность в том или ином виде минерального сырья. Важнейшей задачей этого этапа является получение качественной и количественной оценки техногенных образований, что предопределяет значительные объемы опробования. Связано это с тем, что в поверхностных условиях под влиянием различных процессов

Содержание полезных компонентов в шлаках медной отрасли цветной металлургии Урала.
The content of useful components in the slag of the copper industry of non-ferrous metallurgy of the Urals.

Предприятие, формирующее шлакоотвал	Содержание, мас. %		
	Cu	Zn	S
Среднеуральский медеплавильный завод	0,7–0,9	3–4	1,33
Кировградский медеплавильный комбинат	0,59	2,4	0,13
Карабашский медеплавильный комбинат	0,7–0,8	3–4	1,25
Медногорский медно-серный комбинат	0,27	0,80	1,10

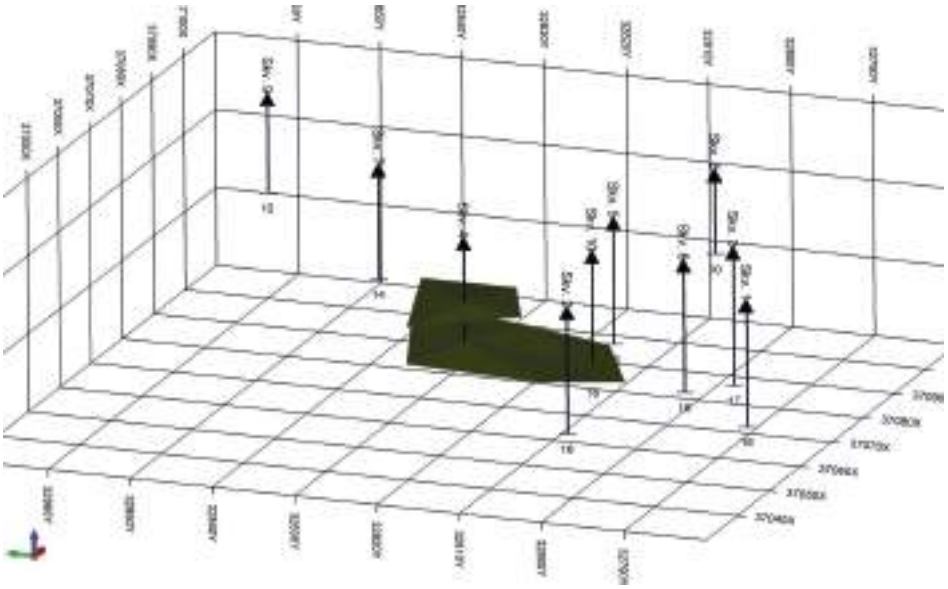


Рисунок 1. Геометризация небольшой залежи полезного компонента в отвале. 1 – пробуренные скважины и их глубина; 2 – залежь полезного компонента.

Figure 1. Geometrization of a small deposit of a useful component in a dump. 1 – drilled wells and their depth; 2 – reservoir of a useful component.

происходит перераспределение полезных компонентов с возможным формированием зоны окисления и обогащенных металлами участков. Ранее [15] для проведения аналитических исследований техногенных образований на этом этапе предложено широкое использование ядерно-физических методов: нейтронно-активационного, рентгеноспектрального, гамма-спектрометрического, которые в комплексе охватывают большой круг химических элементов.

Еще одной особенностью при оценке техногенных месторождений является необходимость оценки их влияния на загрязнение природной окружающей среды и прогноза последующего экологического состояния территории, которая также должна быть комплексной. При этом должны быть изучены в пределах прилегающих к объекту территорий почвы и поверхностные водотоки и загрязнение подземных вод. Для оценки запыленности территории возможно опробование снежного покрова. В целом для оценки экологического состояния техногенных месторождений необходимо использовать все имеющиеся материалы проводимых ранее геоэкологических исследований, в том числе, в первую очередь, данные экологического мониторинга.

Выбор комплекса разведочных работ определяется результатами предварительной оценки объекта, он может быть основан также на данных о содержании редких, редкоземельных, благородных металлов с учетом их распределения в пределах отвалов, хвостохранилищ и т. д. С другой стороны, полученные данные исследования вещественного состава могут определить и возможные технологии разработки и переработки техногенных образований. Необходимость более детального изучения выявленных при ревизионно-оценочных работах техногенных залежей определяется тем, что техногенные образования в процессе их складирования значительно перемешиваются и разрушаются, подвергаются в последующем процессам выветривания (окисления, выщелачивания) и миграции с возможным формированием отдельных обогащенных полезными компонентами участков. Особое внимание необходимо уделять старым отвалам, информация о формировании которых может быть неполной, а чаще отсутствует.

При оконтуривании отдельных залежей техногенно-минеральных объектов рационально применение 3D-компьютерных технологий. Пример оконтуривания отдельной залежи в отвале показан на рис. 1.

Подсчет запасов техногенного месторождения может осуществляться как с использованием традиционных методов, так и с применением технологий блочного моделирования. С применением последних обеспечивается возможность последующей корректировки данных, в том числе и результатов подсчета запасов.

Выводы

Техногенные минеральные месторождения образуют новый вид месторождений, что предполагает изучение особенностей проводимых в пределах подобных объектов геологоразведочных работ. В настоящее время определены главные геолого-промышленные типы техногенных месторождений, в рамках которых рассмотрены главные особенности их исследований. С учетом разнообразного состава слагающих их образований особое внимание необходимо уделять выбору аналитических исследований с широким использованием ядерно-физических методов, в том числе при проведении геоэкологических исследований. На стадии разведочных работ наряду с традиционными методами при оценке запасов рекомендуется применение компьютерных 3D-технологий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ожогина Е. Г., Котова О. Б., Якушина О. А. Горнопромышленные отходы: минералогические особенности // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. 2018. № 6. С. 43–49.
2. Селезнев С. Г., Степанов Н. А. Отвалы Аллареченского сульфидного медно-никелевого месторождения как новый геолого-промышленный тип техногенных месторождений // Изв. вузов. Горный журнал. 2011. № 5. С. 32–40.
3. Якушина О. А., Ожогина Е. Г., Хозяинов М. С. Микротомография техногенного минерального сырья // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. 2015. № 3. С. 38–43. https://doi.org/10.19110/2221-1381-2015-11-38-43

4. Ахманов Г. Г., Васильев Н. Г. К методике изучения и оценки техногенных месторождений // Отечественная геология. 1996. № 10. С. 3–7.
5. Быховский Л. З., Спорыкина Л. В. Техногенные отходы как резерв восполнения минерально-сырьевой базы: состояние и проблемы освоения // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2011. № 4. С. 15–20.
6. Секисов Г. В., Зыков Н. В. Освоение минеральных объектов и методология оценки. М.: Горная книга. 2012. 43 с.
7. Шелагуров В. В. Техногенные месторождения, методы их изучения и оценки // Отечественная геология. 1996. № 2. С. 34–42.
8. Туманова Е. С., Цыбизов А. Н., Блоха Н. Г. и др. Техногенные ресурсы минерального строительного сырья. М.: Недра, 1991. 288 с.
9. Туманова Е. С., Туманов Р. Р. Минеральное сырье. Сырье техногенное: справочник. М.: ЗАО «Геоинформмарк», 1998. 44 с.
10. Kazragis A. High-temperature dekontamination and utilization of phosphogypsum // Journal of Environmental Engineering and Landscape Management. 2004. Vol. 12, № 4. P. 138–145.
11. Winkel P. Recycling-eine Chance für die Zukunft // Galwanotechnik. 2004. Vol. 95, № 10. P. 2539–2547.
12. Макаров А. Б., Талалай А. Г., Хасанова Г. Г. Геолого-промышленные типы техногенных месторождений // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. 2018. № 8. С. 80–85. https://doi.org/10.19110/2221-1381-2018-8-39-45
13. Макаров А. Б., Хасанова Г. Г. Типизация техногенных месторождений (на примере Уральского региона) // Современные концепции развития науки: сб. статей Междунар. науч.-практ. конф. 2017. С. 20–24.
14. Трубецкой К. Н., Уманец В. Н., Никитин М. Б. Классификация техногенных месторождений и основные факторы их комплексного использования // Комплексное использование минерального сырья. 1987. № 12 (114). С. 18–23.
15. Талалай А. Г., Макаров А. Б., Зобнин Б. Б. Техногенные месторождения Урала, методы их исследования и перспективы переработки // Изв. вузов. Горный журнал. 1997. № 11/12. С. 20–36.
16. Рассказов И. Ю., Грехнев Н. И., Александрова Т. Н. Техногенные месторождения в отвалах горно-обогатительных комбинатов Дальневосточного региона // Тихоокеанская геология. 2014. Т. 33. С. 102–114.
17. Хасанова Г. Г. Методические принципы кадастровой оценки техногенно-минеральных образований Среднего Урала: автореф. дис. … канд. геол.-минерал. наук. Екатеринбург, 2003. 17 с.

Статья принята в редакцию 28 июня 2019 г.

УДК 553.4 https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-3-58-62

Technogenic deposits: research features

Anatoliy Borisovich MAKAROV*,
Gul'nara Gabdulbarievna KHASANOVA**,
Aleksandr Grigor'evich TALALAY***

Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia

Relevance of the work. Technogenic deposits formed in recent decades form a new type of deposits and are currently acquiring special significance, however, methodological generalizations of their geological studies are still being carried out in a minor way. Based on previously performed studies, it seems very relevant to generalize the methods used during geological exploration within technogenic deposits.
Purpose. Examination the features of geological studies of technogenic deposits carried out in recent years; determination of the most important methods for studying their geological structure and material composition of technogenic mineral raw materials**.**
Research methodology. The paper analyzes the results of previously performed geological studies of technogenic deposits, their classifications, geological and industrial types to determine the main features of the methodology for their study.
Results of the work. The main geological and industrial types of technogenic deposits, methodological approaches to their study and evaluation are considered. The example of the study of individual groups and classes of technogenic deposits shows a set of methods used for geological research of these objects.
Conclusions. The main features of geological examination of technogenic deposits of various geological and industrial types are determined. It is shown that geological research should be comprehensive; the most important area is geoecological research. Given the diverse composition of their constituent entities, special attention should be paid to the choice of analytical studies with the widespread use of nuclear-physical methods, including when conducting geoecological studies. At the stage of exploration, along with traditional methods, the use of computer 3D technologies is recommended when assessing reserves.

Keywords: technogenic deposits, geological and industrial types, integrated assessment, geoecological studies.

REFERENCES

1. Ozhogina E. G., Kotova O. B., Yakushina O. A. 2018, Mining waste: mineralogical peculiarities. *Vestnik IG Komi NTS UrO RAN* [Bulletin of the Institute of Geology of Komi Scientific Center, Ural Branch of RAS], no. 6, pp. 43–49. (*In Russ.*)
2. Seleznev S. G., Stepanov N. A. 2011, Dumps of the Allarechensky sulfide copper-nickel deposit as a new geological-industrial type of technogenic deposits. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal* [News of the Higher Institutions. Mining Journal], no. 5, pp. 32–40. (*In Russ.*)
3. Yakushina O. A., Ozhogina E. G., Khozyainov M. S. 2015, Microtomography of technogenic mineral raw materials. *Vestnik IG Komi NTS UrO RAN* [Bulletin of the Institute of Geology of Komi Scientific Center, Ural Branch of RAS], no. 3, pp. 38–43. (*In Russ.*) https://doi.org/10.19110/2221-1381-2015-11-38-43
4. Akhmanov G. G., Vasiliev N. G. 1996, On the methodology for the study and evaluation of technogenic deposits. *Otechestvennaya geologiya* [Russian geology], no. 10, pp 3–7. (*In Russ.*)
5. Bykhovsky L. Z., Sporykina L. V. 2011, Technogenic waste as a reserve for replenishing the mineral resource base: state and problems of development. *Mineral'nyye resursy Rossii. Ekonomika i upravleniye* [Mineral resources of Russia. Economics and Management], no. 4, pp. 15–20. (*In Russ.*)
6. Sekisov G. V., Zykov N. V. 2012, *Osvoyeniye mineral'nykh ob"yektov i metodologiya otsenki* [Development of mineral objects and evaluation methodology]. Moscow, 43 p.
7. Shelagurov V. V. 1996, Technogenic deposits, methods for their study and evaluation. *Otechestvennaya geologiya* [Russian geology], no. 2, pp. 34–42. (*In Russ.*)
8. Tumanova Ye. S., Tsybizov A. N., Blokha N. G. et al. 1991, *Tekhnogennyye resursy mineral'nogo stroitel'nogo syr'ya* [Technogenic resources of mineral building materials]. Moscow, 288 p.
9. Tumanova Ye. S., Tumanov R. R. 1998, *Mineral'noye syr'ye. Syr'ye tekhnogennoye* [Mineral raw materials. Technogenic raw materials]: reference book. Moscow, 44 p.
10. Kazragis A. 2004, High-temperature dekontamination and utilization of phosphogypsum. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, vol. 12, no. 4, pp. 138–145.
11. Winkel P. 2004, Recycling-eine Chance für die Zukunft. *Galwanotechnik*, vol. 95, no. 10, pp. 2539–2547.
12. Makarov A. B., Talalay A. G., Khasanova G. G. 2018, Geological and industrial types of technogenic deposits. *Vestnik IG Komi NTS UrO RAN* [Bulletin of the Institute of Geology of Komi Scientific Center, Ural Branch of RAS], no. 8, pp. 80–85. (*In Russ.*) https://doi.org/10.19110/2221-1381-2018-8-39-45
13. Makarov A. B., Khasanova G. G. 2017, *Tipizatsiya tekhnogennykh mestorozhdeniy (na primere Ural'skogo regiona)* [Typification of technogenic deposits (using the Ural region as an example)]. Modern concepts of the development of science. Collection of articles of the International scientific and practical conference, pp. 20–24.
14. Trubetskoy K. N., Umanets V. N., Nikitin M. B. 1987, Classification of technogenic deposits and the main factors of their complex use. *Kompleksnoe Ispol'zovanie Mineral'nogo Syr'a* [Integrated use of minerals], no. 12 (114), pp. 18–23. (*In Russ.*)
15. Talalay A. G., Makarov A. B., Zobnin B. B. 1997, Technogenic deposits of the Urals, methods for their research and prospects for processing. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal* [News of the Higher Institutions. Mining Journal], no. 11/12, pp. 20–36. (*In Russ.*)
16. Rasskazov I. Yu., Grekhnev N.I., Aleksandrova T. N. 2014, Technogenic deposits in the dumps of mining and processing plants of the Far Eastern region. *Tikhookeanskaya Geologiya* [Russian Journal of Pacific Geology], vol. 33, pp. 102–114. (*In Russ.*)
17. Khasanova G. G. 2003, *Metodicheskiye printsipy kadastrovoy otsenki tekhnogenno-mineral'nykh obrazovaniy Srednego Urala* [Methodological principles of cadastral evaluation of technogenic and mineral formations of the Middle Urals], PhD thesis. Ekaterinburg, 17 p.

The article was received on June 28, 2019

* fgg.gpr@m.ursmu.ru
https://orcid.org/0000-0003-4843-3422
** fgg.gpr@m.ursmu.ru
*** talalay@ursmu.ru

УДК 550.837 https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-3-63-71

Предпосылки успешного применения простых методов электрометрии при поисках глубокозалегающих колчеданных месторождений

Вадим Михайлович САПОЖНИКОВ*

Уральский государственный горный университет, Россия, Екатеринбург

Актуальность работы определяется потребностью использования позитивного опыта поисков и разведки медноколчеданных руд в условиях, когда расширение сырьевой базы меднорудной промышленности Урала возможно за счет обнаружения крупных скоплений руд на достаточно больших глубинах. Трудности поисков таких объектов связаны с их слабой проявленностью по всему комплексу геолого-геофизических свойств, и успех может быть получен при последовательном использовании серии косвенных признаков. Наиболее реально можно рассчитывать на выявление крупных рудных залежей при их пологом залегании. Главным объектом исследований должны являться потенциально рудоносные по геолого-геофизическим признакам палеовулканические постройки, а в их пределах – известные и новые рудные поля. На стадии изучения этих построек наиболее оправдано применение простых глубинных методов наземной и скважинной электрометрии.

Целью работы является демонстрация теоретических и практических предпосылок применения простых методов электрометрии, позволяющих последовательно выявлять признаки проявления главных рудоформирующих элементов рудоносных структур, по совокупности которых и можно обнаруживать отдельные рудные залежи и месторождение в целом. Рассматриваются примеры применения методов электропрофилирования, изучения векторов градиента электропроводности, метода мелкомасштабного заряда с выделением аномального поля, скважинной уравновешенной установки, геоэлектрического моделирования разрезов по данным электрокаротажа.

Результаты, полученные при применении простых методов электрометрии на конкретных южноуральских медноколчеданных месторождениях, позволяют продемонстрировать примеры получения поисково-разведочной информации о существовании рудоносных структур и проявлении их отдельных элементов.

Ключевые слова: рудное поле, рудоформирующие элементы рудоносных структур, скважинная электроразведка, аномалия.

Введение

Существует объективная необходимость увеличивать глубинность поисковых работ на колчеданное оруденение. Одним из факторов, позволяющих надеяться на успешное решение этой задачи, может стать обобщение опыта уже проведенных исследований в условиях, приближенных к тем, в которых предполагаются поиски. Естественно, что на больших глубинах интерес представляют крупные объекты, разработка которых окажется рентабельной.

Исходя из теоретических и практических предпосылок, наиболее реально можно рассчитывать на обнаружение относительно пологозалегающих рудных залежей. Признаки их присутствия проявлены обычно слабо, и поэтому вероятность того, что подобные образования еще не выявлены, вполне реальна. Наиболее перспективны поиски глубокозалегающих крупных колчеданных месторождений на Южном и Северном Урале, где мало развиты рудоносные зоны смятия.

Имея в виду положительный опыт поисковых работ на колчеданы, частично обобщенный в монографиях [1–5] и других публикациях, целесообразно обратить внимание на основные геофизические признаки искомых объектов, ориентировка на которые может оказаться полезной. Для этого полезно обратиться к некоторым геологическим и геофизическим моделям, позволяющим подчеркнуть предпосылки решения тех или иных поисковых задач.

Рудоформирующие элементы рудоносных структур

Сразу следует подчеркнуть, что главным объектом исследований должны стать не отдельные рудные тела, а как уже частично разведанные, так и еще не выявленные корневые рудные поля. Известно, что это системы генетически и пространственно связанных рудных и магматических тел, имеющих общие корни. Главные элементы этих сред: источники рудоносных флюидов, каналы для их перемещения, геологические, тектонофизические и петрофизические обстановки, в которых образуются рудные скопления. Очевидно, что проявлению этих рудоформирующих элементов в геофизических полях должно быть уделено основное внимание.

Колчеданные месторождения, как правило, располагаются в пределах палеовулканических построек (рис. 1, а, б). Это могут быть вулканокупольные структуры, в которых рудное поле занимает некоторый объем вулканической постройки. Рудоносны бывают также вулкано-тектонические депрессии, обрамленные вулканическими куполами основного или кислого состава. Наиболее часто колчеданные месторождения связаны с образованием кислых эффузивно-экструзивных построек.

Рудоформирующие элементы дифференцируются по физико-механическим характеристикам, а состав горных пород структурных элементов при этом отступает на второй план. Это относится как к рудоконтролирующим (долгоживущие глубинные разломы), рудоподводящим (приоткрытые участки глубинных разломов) и рудораспределяющим (системы трещин, оперяющие рудоподводящие разломы) каналам, так и к элементам структуры, оказывающим непосредственное влияние на формирование рудных скоплений. К последним относятся рудолокализующие (ореолы метасоматитов, развивающихся по зонам дробления, телам брекчий и пластам пористых пород) и рудоограничивающие (непроницаемые пласты и тела малых интрузий, участки сжатия или смещения слоев, тела, создающие механические, тепловые, химические и другие типы барьеров). Принципиальная схема пространственного положения скрытого колчеданного оруденения показана на рис. 1, в.

Обращаясь к упрощенным моделям палеовулканической постройки (рис. 1, а, б), видим, что это сооружение представляет нагромождение разнообразных вулканических продуктов, местами перекрытых вулканогенно-осадочными породами. Часто постройка бывает разрушена, и породы ее основания обнаруживаются только на периферии палеовулкана. При проседании центральной части вулканов возникают вулкано-депрессионные постройки с крупными кальдерами, заполненными более молодыми вулканитами. На завершающей стадии развития вулкано-магматической

* vmsap@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-9665-5778

системы в ранее сформированную среду внедряются тела малых интрузивных (субвулканических) тел и происходят инъекции активных газов и растворов с образованием ореолов гидротермально-метасоматически измененных и местами минерализованных вулканитов, а также рудных скоплений. Совокупность этих образований и формирует рудное поле, в структуре которого могут быть выделены главные рудоформирующие элементы.

Все рудоформирующие элементы отличаются аномальными физическими свойствами, в первую очередь по плотности и электропроводности. Сконцентрировав внимание на вулканогенных породах, отметим, что по значениям средней плотности для ряда из пород основного состава, кислого состава, метасоматически измененных и сплошных руд характерны соответственно средние значения 2, 8, 2, 64, 2,5 и 4,2 г/см^3 [1]. Очевидно, что существуют благоприятные предпосылки для выделения и разделения приблизительно однородных и достаточно крупных тел или участков вулканических построек, сформированных этими породами по данным гравиразведки.

Наиболее дифференцированы вулканогенно-плутонические породы по электропроводности. Это связано с сильной зависимостью удельного сопротивления горных пород от пористости, сульфидной минерализации и состава подземных вод. Например, увеличение коэффициента пористости породы от 1 до 2 % и повышение минерализации присутствующей в порах воды в 2 раза (что происходит при слабом метасоматозе), практически не влияющие на другие физические свойства и почти незаметные визуально, приводят к уменьшению удельного сопротивления в 8 раз. Поэтому статистические исследования электропроводности на крупных колчеданных месторождениях Урала, по данным электрокаротажа, доказали существование предпосылок для детального картирования рудовмещающих горных пород с выявлением характерной зональности по данным электрометрии. На основе разделения пород на статистически однородные группы установлены их модальные значения по удельному сопротивлению в тысячах Ом × м [6, 7]. Для условно обозначенных по степени изменения (и.) групп пород типичны следующие значения: минерализованные и измененные (0,15), сильно измененные (0,37), средне измененные (1,1), слабо измененные (2,7), неизмененные (8). Показательны осредненные характеристики доли присутствия каждой группы пород в разведанных блоках крупных месторождений. Для перечисленных групп пород эти доли соответственно равны, %: 6, 7, 12, 26 и 46. Доля сплошных достаточно глубоко залегающих руд с удельным сопротивлением меньше 1 Ом × м оценивается величиной около 3 %. Следует подчеркнуть, что осреднение значений в выбранных для изучения интервалах поисково-разведочных скважин не проводилось и исходной моделью реальных геологических тел была двухкомпонентная среда, отражающая избирательность происходивших процессов рудогенеза [6].

Как видим, в пределах рудоносных вулканогенных структур, вмещающих известные колчеданные месторождения, существуют достаточно крупные образования со следами околорудных изменений (в продуктивных поисковых массивах приблизительно 25 % объема) с аномальными свойствами по плотности и электропроводности. Они значительно превосходят по размерам рудные залежи и являются важным поисковым объектом как индикатор месторождений.

Для рудных полей характерна закономерная зональность. Она проявляется по ряду признаков: минералогических, геохимических, физико-механических и др. Существует зональность также по плотности и электропроводности, что следует учитывать при поисковых работах.

Модели, иллюстрирующие проявление рудоформирующих элементов в аномальных геофизических полях

В окрестностях рудных скоплений с максимальной плотностью вмещающие их породы обычно насыщены сульфидами и имеют хотя и меньшую, но все же повышенную плотность по сравнению с неизмененной средой. Следовательно, эти образования усиливают положительную аномальную составляющую гравитационного поля Δg_a от рудных скоплений. Основную часть ореолов метасоматитов составляют породы с относительно пониженной плотностью. Они обуславливают появление обширных отрицательных аномалий силы тяжести, характерных для рудных полей. Сложный вид аномального поля Δg_a для ореола метасоматитов, вмещающих рудную залежь, продемонстрирован на упрощенной аналитической модели (рис. 2, а). Также сложный вид имеет аномальное поле в методе заряда, когда источник тока

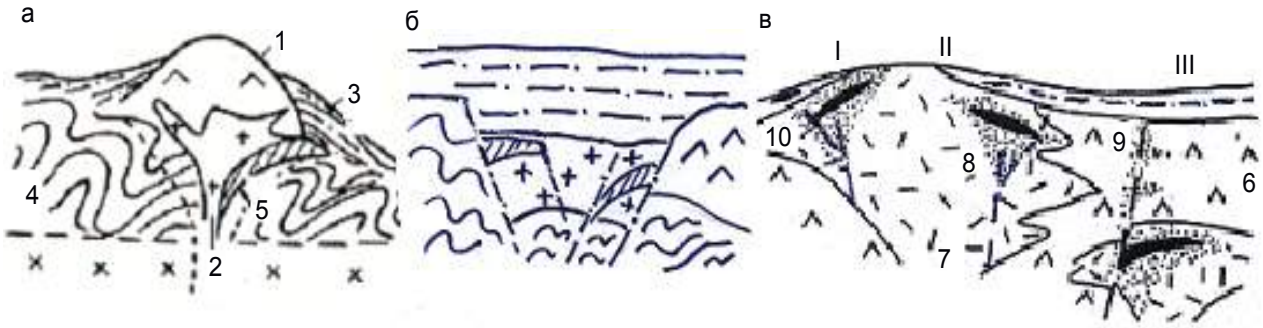


Рисунок 1. Модели вулканокупольной и вулкано-депрессионной рудоносной структур (а, б) и схема пространственного положения скрытых колчеданных месторождений (в) (по А. М. Дымкину, Г. А. Вострокнутову). 1 – вулканический массив преимущественно из пород основного состава; 2 – плутонические составляющие из пород кислого состава; 3 – вулканогенно-осадочные образования, синхронные вулканизму; 4 – вулканогенно-осадочный комплекс основания; 5 – рудные поля; 6 – породы безрудных комплексов; 7 – породы рудовмещающих комплексов; 8 – околорудные эндогенные геохимические, минеральные и метасоматические ореолы; 9 – тектонические нарушения, играющие роль рудоподводящих каналов; 10 – рудные тела.

Figure 1. Models of the volcanic dome and volcanic depression ore-bearing structures (a, b) and the spatial pattern of hidden pyritic deposits (c) (according to A. M. Dymkin, G. A. Vostroknutov). 1 – volcanic massif mainly from rocks of the main composition; 2 – plutonic components from rocks of acidic composition; 3 – volcanic-sedimentary formations synchronous to volcanism; 4 – volcanic-sedimentary base complex; 5 – ore fields; 6 – rocks of barren complexes; 7 – rocks of ore-bearing complexes; 8 – endogenous endogenous geochemical, mineral and metasomatic halos; 9 – tectonic disturbances, playing the role of ore supply channels; 10 – ore bodies.

погружен в ореол метасоматитов с повышенной по сравнению с вмещающими породами электропроводностью. При субгоризонтальной кровле ореола на его границах наблюдаются максимумы аномального потенциала U_a, фиксируя которые в плане, можно оконтурить границы ореола. Если среди измененных пород существует пологозалегающая рудная залежь, она создаст знакопеременную (двухполюсную) аномалию, которая накладывается на аномалию от ореола, чем дополнительно усложняет суммарное поле. Модельный график U_a для такой структуры показан на рис. 2, а. В случае наклонного залегания ореола максимумом аномального поля от него отметится только приподнятая граница ореола (рис. 2, б). Отрицательная аномалия будет наблюдаться в районе источника тока и погруженной части ореола.

Сравнительно просто рудоносные ореолы околорудно измененных горных пород выявляются по измерениям вектора градиента электропроводности с помощью крестообразной пятиэлектродной установки (электрод *A*, эмиссирующий постоянный ток *J*, и две пары приемных электродов *MN* (*MA* = *AN*)) [4]. Для определения направления наиболее резкого падения кажущегося сопротивления в зоне действия установки строят вектор по составляющим измеренных значений разности потенциалов ΔU_1 и ΔU_2, координатные оси для которых направлены из *A* на электроды N_1 и N_2. Значение вектора градиента электропроводности вычисляют по формуле

$$\delta\rho к = 2\pi J{-}1(\Delta U1^2 + \Delta U2^2\ )^{-1/2}.$$

Модельный пример выявления ореола метасоматитов (полушар) и рудной залежи (круглый диск) по совокупности измерений векторов $\delta\rho_к$ показан на рис. 2, г.

При геофизических исследованиях потенциально рудоносных структур следует использовать возможность картировать как индикаторы месторождений такие рудоформирующие элементы рудных полей, какими являются рудоподводящие и рудораспределяющие разрывные нарушения. Часто они имеют выход к дневной поверхности и проявляются как плоские проводники, уходящие на глубину. Признаком этих объектов являются линейные оси отрицательного аномального поля, полученного при обработке результатов съемки методом мелкомасштабного заряда (модельный пример для двух разломов на рис. 2, е), или на графиках градиента кажущегося сопротивления $\rho_к$ метода комбинированного электропрофилирования [8]. Интерпретация сложных графиков электропрофилирования упрощается после вычисления градиента $\delta\rho_к$ на отрезке, равном размеру установок, и отнесенного к началу отрезка. На модельном примере над вертикальным проводником наблюдается совпадение четких отрицательных аномалий $\delta\rho_к$, вычисленных для встречных установок *AMN* и *MNB* (рис. 2, д).

Опыт применения электрометрии при исследованиях рудоносных структур

Выявление перспективных на рудоносность палеовулканических построек по комплексу геолого-геофизических признаков подробно рассмотрено в ряде специальных публикаций [1, 9, 10], поэтому сосредоточим внимание на возможностях обнаружения в них рудных полей и месторождений методами электрометрии. Разработаны и в ряде случаев успешно применяются электроразведочные технологии, позволяющие получить данные о пространственном распределении удельного сопротивления, а также поляризуемости горных пород, по которым можно прогнозировать при-

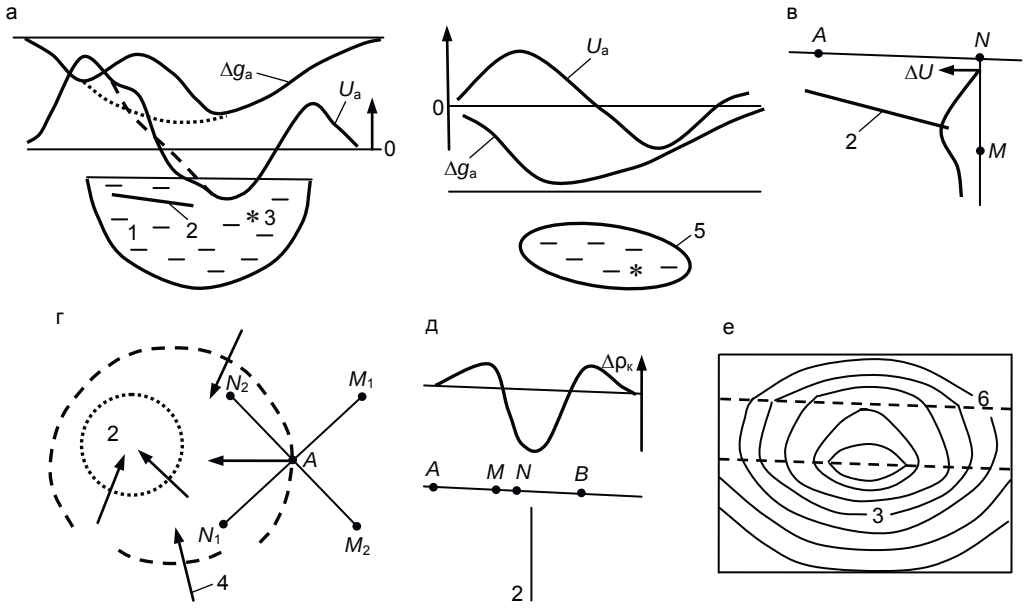


Рисунок 2. Модельные примеры проявления рудоформирующих элементов рудоносных структур (ореола метасоматитов, локальных тел – проводников, разрывных нарушений) в аномальных геофизических полях. 1 – полушар (модель ореола); 2 – диск (модель рудного тела (а, б, в) или рудоподводящего канала (г)); 3 – источник тока; 4 – векторы градиента $\rho_к$; 5 – эллипсоид (модель ореола), 6 – полуплоскости (модель глубинного разлома); для модели а; · · · и - - - – участки графиков аномального поля без влияния рудного тела.

Figure 2. Model examples of the occurrence of ore-forming elements of ore-bearing structures (halo of metasomatites, local conductive bodies, discontinuous disturbances) in abnormal geophysical fields. 1 – a hemisphere (halo model); 2 – disk (model of the ore body (a, b, c) or the ore supply channel (d)); 3 – current source; 4 – gradient vectors ρк; 5 – ellipsoid (halo model), 6 – half-planes (deep fault model); for model a; · · · And - - - - plots of the anomalous field graphs without the influence of the ore body.

сутствие на глубине рудных залежей [11–15]. Однако это достаточно трудоемкие исследования, требующие солидных временных и материальных затрат. Их применение оправдано на стадии разведки, когда стоит задача по определению масштабов оруденения, существование которого доказано результатами буровой разведки.

На этапе же поисковых работ, когда рудоперспективность изучаемых вулканических построек не оценена, предпочтения заслуживает применение простых, но достаточно глубинных методов электроразведки. В одном из таких методов выполняется определение вектора градиента электропроводности с крестообразной установкой (рис. 2, в), который дает характеристику неоднородности среды приблизительно в пределах полушара с центром в середине установки (*A*) и радиусом, равным полуразмеру установки (*MN*/2). Он может составлять сотни метров, что обеспечивает изучение крупного массива горных пород. Съемку допустимо проводить по редкой и нерегулярной сети для выявления на исследуемой площади главнейших геологических объектов, к которым относятся рудоформирующие элементы структур.

Ценный опыт получен при изучении территории, включающей месторождение Молодежное [4, 16]. Приведенный на рис. 3 план векторов, фиксирующих направления уменьшения удельного сопротивления и изолинии этого параметра, построен всего по 15 стоянкам установки. Однако он полностью согласуется с геолого-геофизическими данными детальной разведки рудного поля, так как имеет признаки присутствия субмеридиональной тектонической зоны смятия, игравшей роль рудоподводящего канала, оперяющего диагонального разрывного нарушения со следами околорудных изменений и рудных тел.

На перспективных участках работы обычно начинаются с проходки скважин. Первые скважины могут не вскрыть рудные скопления. Однако по диаграммам методов электрокаротажа КС, ПС и МЭП можно заметить присутствие в разрезе пересечения околорудно-измененных пород: низкие сопротивления по КС, минерализацию по МЭП и признаки рудной залежи по аномальному полю ПС. Для выявления направлений, в которых следует продолжать поиски, целесообразно выполнить измерения по скважине разности потенциала ΔU с помощью уравновешенной установки. Модельный пример ее применения приведен на рис. 2, в. В качестве производственного примера на рис. 4 представлены результаты методов электрометрии по безрудной скважине, пробуренной на периферии Узельгинского колчеданного месторождения [16].

На диаграмме КС (рис. 4, б) выделяются два интервала пород с аномально повышенной электропроводностью, но наиболее интересна широкая отрицательная аномалия поля ПС, которая может классифицироваться как проявление влияния рудного тела. Для демонстрации возможностей выявления направления на объект, с которым связаны аномалии электрокаротажа, выполнены измерения по скважине с уравновешенной установкой при нескольких ориентациях токовой установки *AB* на дневной поверхности. Значительная положительная аномалия на глубине была получена при ориентировке токового электрода *A* на СЗ, З и ЮЗ, а минимальные для *C* (кривые *1* и *2* на рис. 4, б). Построенная по аномальным значениям ΔU для глубины 435 м полярная диаграмма отражает рудоперспективные направления, что подтвердили результаты оконтуривания рудной залежи V (рис. 4, а, в) в окрестностях исследуемой скважины.

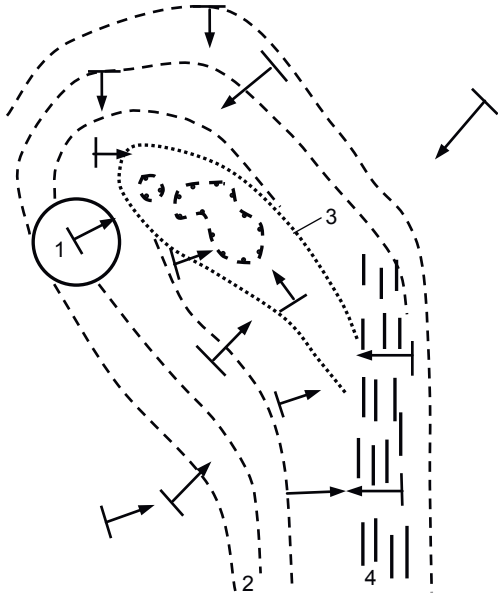


Рисунок 3. План векторов градиента электропроводности на территории, включающей месторождение Молодежное. 1 – векторы градиента электропроводности с размером, соответствующим радиусу площади исследования крестообразной установкой; 2 – условные изолинии $\rho_к$ (нормальные векторы); 3 – контуры ореола околорудно-измененных пород, включающего рудные залежи; 4 – тектоническая зона смятия.

Figure 3. The scheme of the vectors of the conductivity gradient in the territory, including the Molodezhnoye deposit. 1 – vectors of the gradient of electrical conductivity with a size corresponding to the radius of the research area of the cruciform installation; 2 –- conditional contours ρк (normal to vectors); 3 – contours of the halo of ore-modified rocks, including ore deposits; 4 – tectonic zone of collapse.

Еще более показательны результаты электрометрии на одном из широтных профилей Узельгинского месторождения с двухгоризонтной рудоносностью (рис. 5). Согласно данным наземной электрометрии, на этом профиле отмечены признаки глубинных проводников. Наиболее отчетливо они проявились на графике редко применяемой двухэлектродной установки *AM*, глубинность которой приблизительно равна 2*AM*. Сложный вид графиков кажущегося сопротивления $\rho_к$ установок комбинированного электропрофилирования связан с меньшей в 2 раза глубиной исследования (приблизительно величина размера установок), наибольшей чувствительностью к вертикальным проводникам и наличием над верхним рудным телом неизмененных высокоомных пород. При вычислении градиента $\rho_к$ вид графиков упрощается и на нем заметны две отрицательные аномалии от проводников. Локальная аномалия связана, согласно данным детальной разведки, с субвертикальным рудоподводящим разрывным нарушением, хорошо проявленным в рельефе руслом речки Узельга. Другая аномалия, как видно из геоэлектрического разреза, объясняется существованием надрудной зоны измененных пород западнее верхнего рудного тела. Показательно, что обе аномалии от проводников совпали с геохимическими аномалиями, которые являются признаками оруденения на глубине, но фиксируют участки надрудных пород с повышенной проницаемостью иногда в стороне от рудных тел. Такое совпадение электроразведочных и геохимических аномалий может служить основанием для проведения детальных поисковых работ.

На примере разведочного профиля (рис. 5) можно продемонстрировать возможность правильно сориен-

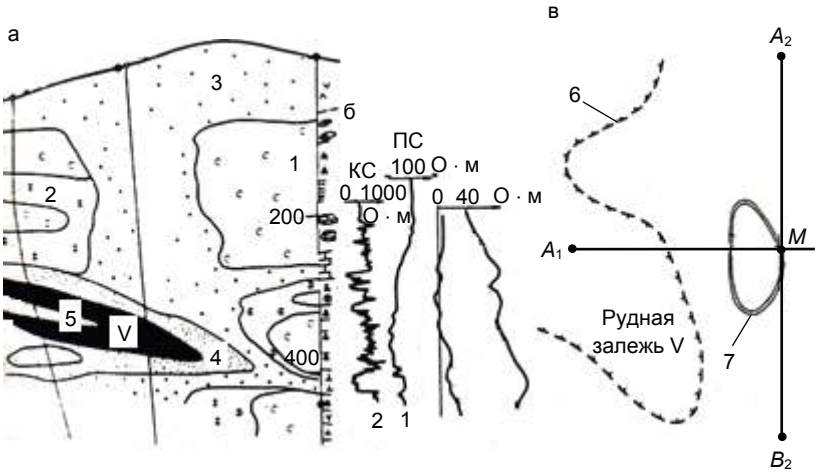


Рисунок 4. Геоэлектрический разрез (а), диаграммы электрометрии по безрудной скважине (б) и полярная диаграмма аномального поля (в), построенная по измерениям с уравновешенной установкой на Узельгинском месторождении. 1–4 – породы, классифицированные по величине электропроводности как околорудно-измененные слабо-, средне-, сильно-, с сульфидной минерализацией соответственно; 5 – руды, 6 – частичный контур рудной залежи в плане, 7 – полярная диаграмма; A_1, A_2, B_2 – положение токовых электродов в плане.

Figure 4. Geoelectric section (a), electrometry diagrams for a barren well (b) and a polar diagram of an anomalous field (c), constructed from measurements with a balanced installation at the Uzelginsky field. 1–4 – rocks classified according to the value of electrical conductivity as ore-modified slightly, medium, strongly, with sulfide mineralization, respectively; 5 – ore, 6 – partial contour of the ore deposit in the plan, 7 – polar diagram; A1, A2, B2 – the position of the current electrodes in the plan.

тировать такие поиски с применением скважинной электроразведки. В безрудной скважине на границе рудного поля были выполнены измерения разности потенциалов с уравновешенной установкой для разносов $AN = NB$, равных 300 и 600 м. При расположении токового электрода A в сторону рудной части разреза были получены положительные аномалии на глубине, соответствующей залеганию близлежащих рудных тел (рис. 5, г). Аномалия от нижнего рудного горизонта проявилась только при большом разносе. Модельный пример на рис. 2, в является теоретической иллюстрацией к практическим аномальным кривым.

Следует подчеркнуть, что данные скважинной электроразведки, полученные в первых поисковых скважинах, способствовали открытию Узельгинского месторождения. Представленные же результаты электрометрии были получены на завершающей стадии разведки месторождения при проведении опытных работ с целью совершенствования методики поисковой скважинной электроразведки.

На Узельгинском и некоторых других месторождениях были построены геоэлектрические разрезы по данным электрокаротажа. Они помогают продемонстрировать закономерности пространственного распределения электропроводности в пределах рудных полей. Это позволяет более объективно оценивать возможности наземной и скважиной электроразведки для выявления глубокозалегающих рудных месторождений по зонально проявленным околорудным ореолам с повышенной электропроводностью. Одновременно удается получить дополнительную информацию, проливающую свет на историю формирования изученных объектов.

На примере рассматриваемых геологического и геоэлектрического разрезов (рис. 5) видно, что рудообразование протекало в два этапа. Вначале на контакте дух разновозрастных субвулканических тел кислого состава, игравшего роль рудоподводящего канала, под непроницаемым слоем известняков сформировалось верхнее рудное тело. Последующие активные флюиды привели к образованию надрудных геоэлектрических зон, фиксируемых методами электрометрии. Впоследствии, благодаря внедрению в отмеченный канал тела эксплозивных брекчий, образовалась ловушка с экраном для рудоносных растворов второго этапа рудообразования, в которой и сформировалось нижнее рудное тело. На уровне изученного разреза рудное поле представляет достаточно крупный блок с неравномерным распределением руд и околорудно-измененных пород с повышенной электропроводностью, перекрытых и ограниченных по латерали неизмененными высокоомными породами. Обнаружить такой объект можно только с помощью методов, обладающих большой глубинностью. Как было отмечено ранее, на отдельных участках следы глубинного оруденения можно обнаружить по косвенным признакам.

При оценке перспективности вулканических построек на рудоносность важной задачей является оконтуривание массива горных пород с признаками рудного поля. Как показал опыт разведки Подольского месторождения, эффективно проведение мелкомасштабной съемки методом заряда с вычислением аномальной составляющей потенциала U_a. Потенциальная установка, применяемая в методе заряда, обеспечивает достаточно большую глубинность исследований этим методом с выявлением основных рудоформирующих элементов рудоносных структур. Интерпретация плана изолиний и графиков U_a позволяет выявить границы скрытых проводников, которые в первую очередь связаны с ореолами метасоматитов, а в благоприятных случаях с рудными залежами, а также рудоподводящими каналами.

Подольское месторождение сформировалось в пределах существенно разрушенной вулканической постройки. Под мощной (400–500 м) толщей вулканогенно-осадочных пород обнаружена структура в виде брахиантиклинали, центральная часть которой сформирована породами кислого состава, а породы основного состава выявлены на периферии постройки (рис. 6, а) [5, 16]. Центральную часть структуры составляют серии субвулканических пород, отличающиеся

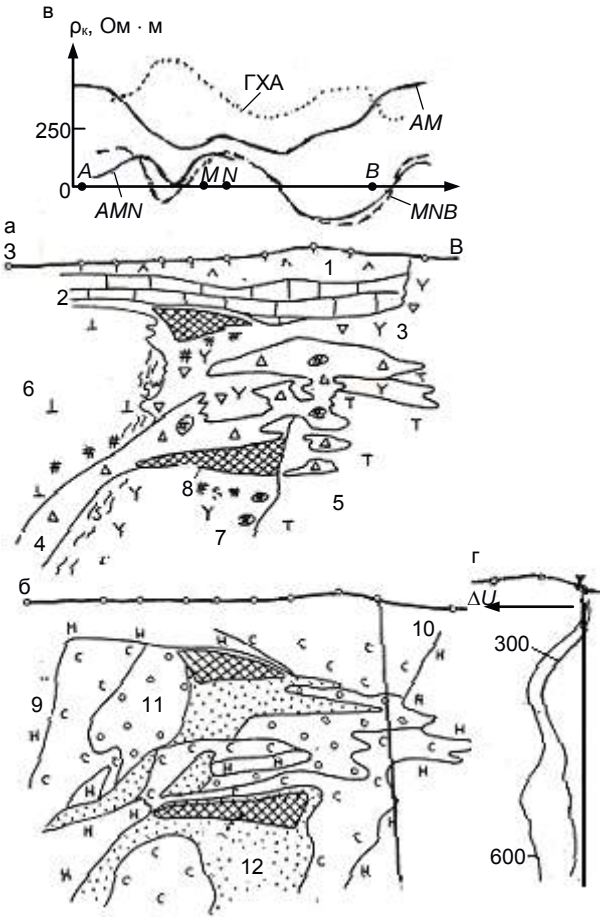


Рисунок 5. Результаты наземной (в) и скважинной (г) электрометрии на широтном разведочном профиле, для которого построены геологический (а) (по Г. В. Петрову) и геоэлектрический (б) разрезы. 1 – диабазы; 2 – известняки; 3 – дацитовые порфириты, местами брекчированные; 4 – эксплозивные брекчии; 5 – липаритовые порфиры; 6 – андезито-дацитовые порфириты; 7 – серицитизация, окварцевание, сульфидизация; 8 – руды; 9–12 – породы, классифицированные по величине электропроводности как неизмененные, околорудно-измененные слабо-, средне-, сильно измененные соответственно; ГХА – геохимические аномалии.

Figure 5. The results of ground (c) and borehole (d) electrometry on a latitudinal exploration profile for which geological (a) (according to G. V. Petrov) and geoelectric (b) sections were constructed. 1 – diabase; 2 – limestones; 3 – dacitic porphyrites, brecciated in places; 4 – explosive breccias; 5 – liparite porphyry; 6 – andesite-dacite porphyrites; 7 – sericitization, silicification, sulfidization; 8 – ore; 9–12 – rocks classified by conductivity as unchanged, ore-modified slightly, medium, strongly altered, respectively; GHA – geochemical anomalies.

составом, морфологией и возрастом. Месторождение представляет собой совокупность сближенных рудных залежей, сформировавшихся под субвулканическим силлообразным телом, наиболее молодым из субвулканитов и сыгравшим роль экрана для рудных растворов. Под рудными скоплениями фиксируется сульфидная минерализация и уходящая на глубину зона метасоматитов. Важную роль в их формировании и рудообразовании сыграло тектоническое нарушение, показанное на рис. 6, а.

Из геофизических признаков этой рудоносной структуры отметим обширную и протяженную площадную субмеридиональную положительную аномалию поля силы тяжести, связанную с грядой вулканических построек, одной из которых является и Подольский палеовулкан. В пределах этой гряды обнаружено несколько рудопроявлений. В районе же Подольского месторождения отмечена более локальная отрицательная аномалия, которую можно связывать с областью рудного поля. Над главными рудными залежами месторождения в гравитационном поле выделена еще более локальная положительная аномалия, присутствие которой заметно на графике Δg по продольному профилю (рис. 4, а). Она отражает влияние плотных рудных масс.

Достаточно информативным оказалось аномальное поле заряда в безрудную скважину 1 (рис. 6, в), вычисленное путем исключения из измеренного поля (рис. 6, б) нормальной составляющей для модели двухслойной среды. Так, на плане изолиний U_a линией положительных аномалий A_1 отмечаются границы рудого поля, в пределах которого электропроводность горных пород в несколько раз выше, чем за его пределами. Теоретическая предпосылка для обоснования такого вывода продемонстрирована на модельном примере (рис. 2, а), а результаты электрокаротажа подтверждают повышение по электропроводности пород в пределах контура аномалии A_1. Присутствие оруденения проявлено слабо, и только на уровне дальней от заряда границе отмечается локальное повышение на графике U_a (рис. 6, а). Дополнительное усложнение в график аномального поля вносит тектоническое нарушение, классифицируемое как рудоподводящий канал. Показательно, что при положении источника тока на дневной поверхности в районе восточной границы рудных скоплений зафиксирована четкая отрицательная аномалия, от плоского проводника, уходящего на глубину, характерная для разрывного нарушения, выходящего к дневной поверхности. На плане аномального поля заряда хорошо заметно присутствие отрицательной линейной аномалии A_2 с ответвлением в сторону выделяемого рудого поля. Вероятно, так в плане фиксируется рудоподводящий канал.

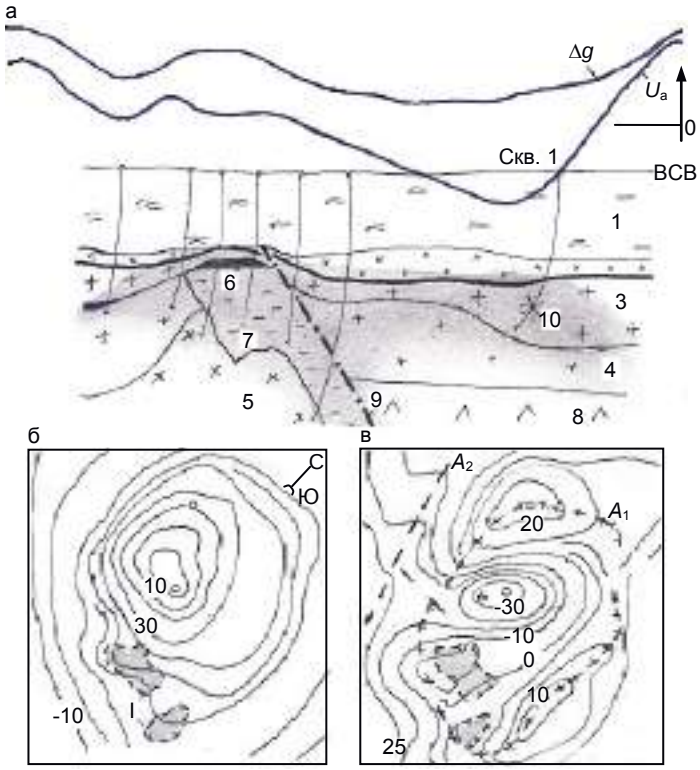


Рисунок 6. Графики геофизических полей Δ*g* и U_a по продольному профилю месторождения Подольское (геологический разрез по И. Б. Серавкину и А. М. Косареву) (а), планы изолиний измеренного потенциала (б) и аномального потенциала U_a (в) поля заряда с контурами рудных залежей [2]. 1 – вулканогенно-осадочные породы; 2 – вулканокласты; 3–5 – серии разновозрастных субвулканитов кислого состава; 6 – колчеданные руды; 7 – метасоматиты; 8 – породы основного состава; 9 – разрывное нарушение; 10 – заряд; серый фон – область повышения электропроводности пород; A_1, A_2 – оси положительных и отрицательных аномалий соответственно.

Figure 6. Graphs of the geophysical fields Δg and Ua along the longitudinal profile of the Podolskoye field (geological section according to I. B. Seravkin and A. M. Kosarev) (a), schemes of isolines of the measured potential (b) and anomalous potential Ua (c) charge fields with the contours of ore deposits [2]. 1 – volcanic-sedimentary rocks; 2 – volcanoclasts; 3–5 – series of acidic subvolcanics of different ages; 6 – pyrite ores; 7 – metasomatites; 8 – rocks of the main composition; 9 – discontinuous violation; 10 – charge; gray background – an area of increasing the electrical conductivity of rocks; A1, A2 are the axes of positive and negative anomalies, respectively.

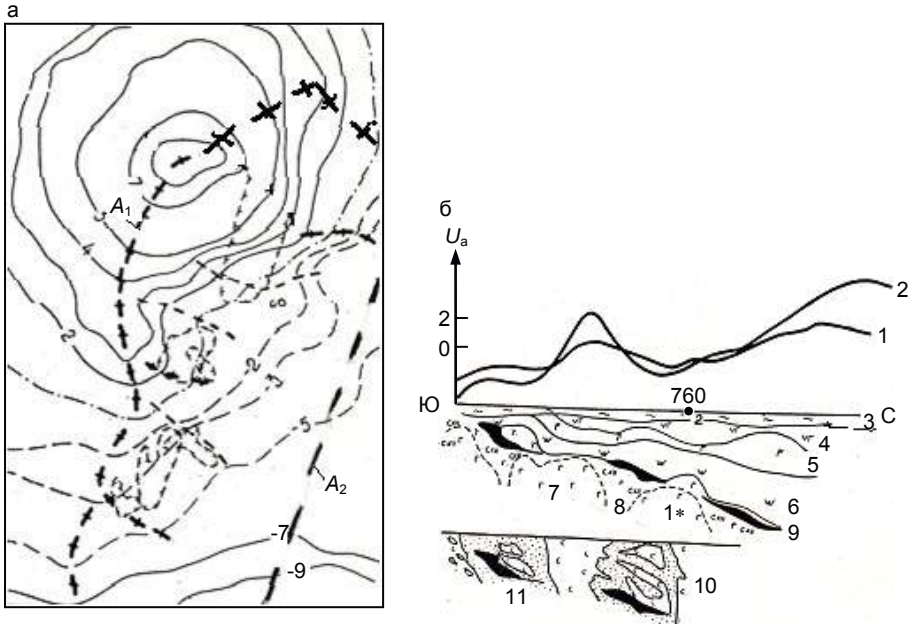


Рисунок 7. План изолиний аномального потенциала поля заряда 1 с выделенными линиями осей и проекциями рудных залежей (а), графики аномального потенциала поля зарядов 1 и 2 над геологическим (по И. Б. Серавкину) и геоэлектрическим разрезами (б) месторождения Юбилейное. 1, 2 – заряды; 3 – осадочные отложения; 4, 5 – слои пород основного состава; 6 – кислые вулканиты; 7 – породы основания вулкана; 8 – метасоматиты; 9 – рудные тела; 10 – слабоизмененные и высокоомные породы; 11 – околорудно-измененные породы с повышенной электропроводностью.

Figure 7. Scheme of isolines of the anomalous potential of the charge field 1 with the marked axis lines and projections of the ore deposits (a), graphs of the anomalous potential of the charge field 1 and 2 over the geological (according to I. B. Seravkin) and geoelectric sections (б) of the Yubileynoye deposit. 1, 2 – charges; 3 – sedimentary deposits; 4, 5 – layers of rocks of the main composition; 6 – acidic volcanics; 7 – rocks of the base of the volcano; 8 – metasomatites; 9 – ore bodies; 10 – slightly modified and high resistance rocks; 11 – ore-modified rocks with increased electrical conductivity.

Из приводимых геофизических материалов по Подольскому месторождению видно, что в совокупности характерные аномалии гравиметрии и электроразведки дают основания заметить признаки рудоносности вулканической постройки, более углубленное изучение которой привело к обнаружению промышленных руд. Опытные работы на том же Подольском рудном поле доказали существование такой возможности по данным зондирования методом переходных процессов при удачном расположении петли, например, с учетом аномалий, обнаруженных более простыми методами.

Не всегда применение мелкомасштабного заряда позволяет полностью оконтурить границы рудного поля. Например, в районе месторождения Юбилейное, сформировавшегося в моноклинальной части палеовулкана на основании из пород основного состава, рудоносная толща метасоматитов погружается на юго-восток [5, 16]. Поэтому в аномальном поле заряда, помещенного в скважину 760, положительной аномалией A_1 отметились только северная и западная границы рудного поля (рис. 7, а). Обширную отрицательную аномалию A_2 можно связывать с крупным глубинным разломом, от которого нормально к нему протянулись рудоподводящие разрывные нарушения, обеспечившие поступления рудоносных растворов в места формирования рудных скоплений. Как заметно по плану аномального поля заряда (рис. 7, а), над рудными залежами месторождения наблюдаются локальные знакопеременные аномалии, отражающие двухполюсную структуру аномального поля, характерную для локальных проводников. Модельные примеры, представленные на рис. 2, а, б, помогают признать правильными эти выводы.

Появлению локальных аномалий над рудными залежами способствовали геоэлектрические надрудные зоны повышенной электропроводности. Существование таких зон, продемонстрированное на продольном геолого-геофизическом разрезе (рис. 7, б), характерно для многих рудопроявлений и иногда обнаруживается наземными методами электроразведки. В рассматриваемом примере блоковая геоэлектрическая структура на продольном профиле проявляется локальными знакопеременными аномалиями и в поле заряда, расположенного на дневной поверхности. Правильный прогноз положения северной границы рудного поля способствовал обнаружению самой глубокозалегающей рудной залежи VI.

Выводы

Углубление теоретических основ скважинной электроразведки и накопленный опыт ее применения на южноуральских колчеданных месторождениях позволяют говорить о существовании благоприятных предпосылок для продолжения поисков глубокозалегающих рудных месторождений на перспективных территориях в пределах известных и потенциально перспективных рудоносных структур. Приводимые в работе модельные и практические примеры применения для этих целей комплекса методов полевой и скважинной электрометрии являются иллюстрацией возможностей получения положительных результатов решения проблемы поисков глубокозалегающих колчеданных месторождений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Виноградов А. М. Геополя и колчеданы Южного Урала. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2016. 364 с.
2. Электроразведка рудных полей методом заряда. Л.: Недра, 1984. 216 с.
3. Кормильцев В. В., Семенов В. Д. Электроразведка методом заряда. М.: Недра, 1987. 218 с.
4. Сапожников В. М., Шевченко В. Г. Теория и методика электроразведки в градиентных средах. Л.: Недра, 1992. 135 с.
5. Поиски скрытого колчеданного оруденения на Урале. М.: Наука, 1983. 126 с.
6. Сапожников В. М. Использование диаграмм каротажа для петрофизического картирования рудовмещающих горных пород // Методика поисков и разведки глубокозалегающих рудных месторождений. Свердловск: Изд-во УПИ, 1977. Вып. 1. С. 11–19.
7. Дьяконов Б. П., Кононенко И. И., Сапожников В. М., Кашкаров А. А. Геоэлектрическое строение рудных полей Урала и сопредельных площадей // Электромагнитные методы при исследовании земных недр. Свердловск: Изд-во УНЦ АН СССР, 1983. С. 41–55.
8. Сапожников В. М., Ермолаев К. М. Скважинная электроразведка разрывных нарушений в рудных полях. // Изв. УГГУ. 2017. Вып. 1(45). С. 32–35.
9. Виноградов А. М., Малышев А. И. Факторы и критерии прогноза, направление и методика поисков крупных медноколчеданных месторождений на Урале // Литосфера. 2014. № 5. С. 90–109.
10. Ivanov K. S., Puchkov V. N., Fyodorov Yu. N., Erokhin Yu. V., Pogromskaya O. E. Tectonics of the Urals and adjacent part of the West-Siberian platform basement: Main features of geology and development // Journal of Asian Earth Sciences. 2013. Vol. 72. P. 12–24. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2013.02.029
11. Storz H., Storz W., Jacobs F. Electrical resistivity tomography to investigate geological structures of the earth's upper crust // Geophysical Prospecting. 2000. Vol. 48, issue 3. P. 455–471. https://doi.org/10.1046/j.1365-2478.2000.00196.x
12. Wisen R., Auken E., Dahlin T. Combination of ID laterally constrained inversion and 2D smooth inversion of resistivity data with a priori data from boreholes // Near Surface Geophysics. 2005. Vol. 3, issue 2. P. 71–79. https://doi.org/10.3997/1873-0604.2005002
13. Бобачев А. А., Яковлев А. Г., Яковлев Д. В. Электротомография – высокоразрешающая электроразведка на постоянном токе // Инженерная геология. 2007. № 3. С. 31–35.
14. Apostolopoulos G. Comdined Schlumberger and dipole-dipole array for gydrogeologic applications // Geophysics. 2008. Vol. 73, issue 5. P. F187–F195. https://doi.org/10.1190/1.2950032
15. Arzhantseva I. A., Andreyev M. A., Akulenko S. A., Kats M. J., Modin I. N. Geophisical Investigations on Por-Bajin Island, Tuva (Russia) // 8th Intern. Conf. on Archaeological Prospection (9–12 sept.). Paris, 2009. 4 p.
16. Прокин В. А., Нечеухин В. М., Сопко П. Ф. и др. Медноколчеданные месторождения Урала. Геологические условия размещения. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1985. 288 с.

Статья принята в редакцию 14 мая 2019 г.

УДК 550.837 https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-3-63-71

Conditions for successful application of simple electrometry methods in searching for deep-seated pyrite deposits

Vadim Mikhailovich SAPOZHNIKOV*

Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia

Relevance of the work is determined by the need to use the positive experience of prospecting and exploration for copper pyrite ores in conditions when the expansion of the raw material base of the copper ore industry of the Urals is possible by detecting large accumulations of ores at sufficiently large depth. Difficulties in searching for such objects are associated with their weak occurrence over the entire complex of geological and geophysical properties, and a successful result can be obtained by using a series of indirect indicators. Substantially, one can identify large ore deposits when they are shallow. The main object of research should be paleovolcanic structures that are potentially ore-bearing by geological and geophysical features, and within them - well-known and new ore fields. At the stage of studying these structures, it is most justified to use simple in-depth methods of surface and downhole electrometry.

Purpose of the work is to demonstrate the theoretical and practical conditions for the application of simple electrometry methods, which make it possible to consistently identify signs of occurrence of the main ore-forming elements of ore-bearing structures, from the totality of which it is possible to detect individual ore deposits and the deposit as a whole. Examples of the application of electric profiling methods, studying the vectors of the electric conductivity gradient, the small-scale charge method with the allocation of an anomalous field, a well-balanced installation, and geoelectric section modelling based on electric logging data are considered.

Results obtained by applying simple electrometry methods to specific South Ural copper pyrites deposits allow us to show examples of obtaining exploration information about the existence of ore-bearing structures and the occurrence of their individual elements.

Keywords: ore field, ore-forming elements of ore-bearing structures, borehole electrical exploration, anomaly

REFERENCES

1. Vinogradov A. M. 2016, *Geopolya i kolchedany Yuzhnogo Urala* [Geofields and pyrites of the Southern Urals], Ekaterinburg, 364 p.
2. 1984, *Elektrorazvedka rudnykh poley metodom zaryada* [Electric exploration of ore fields by the charge method], 216 p.
3. Kormil'tsev V. V., Semenov V. D. 1987, *Elektrorazvedka metodom zaryada* [Electrical exploration by the charge method]. Moscow, 218 p.
4. Sapozhnikov V. M., Shevchenko V. G. 1992, *Teoriya i metodika elektrorazvedki v gradiyentnykh sredakh* [Theory and technique of electrical exploration in gradient media], 135 p.
5. 1983, *Poiski skrytogo kolchedannogo orudeneniya na Urale* [The search for hidden pyrite mineralization in the Urals], 126 p.
6. Sapozhnikov V. M. 1977, *Ispol'zovaniye diagramm karotazha dlya petrofizicheskogo kartirovaniya rudovmeshchayushchikh gornykh porod* [Use of logging diagrams for petrophysical mapping of ore-bearing rocks]. Methods of prospecting and exploration of deep-lying ore deposits. Sverdlovsk, vol. 1, pp. 11–19.
7. D'yakonov B. P., Kononenko I. I., Sapozhnikov V. M., Kashkarov A. A. 1983, *Geoelektricheskoye stroyeniye rudnykh poley Urala i sopredel'nykh ploshchadey* [Geoelectric structure of the ore fields of the Urals and adjacent areas]. Electromagnetic methods in the study of the earth's interior, Sverdlovsk, P. 41–55.
8. Sapozhnikov V. M., Ermolaev K. M. 2017, Borehole electrical exploration of explosive faults in ore fields. *Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta* [News of the Ural State Mining University], vol. 1(45), pp. 32–35. (*In Russ.*)
9. Vinogradov A. M., Malyshev A. I. 2014, Factors and forecast criteria, direction and methodology of searches for large copper-pyrite deposits in the Urals. *Litosfera* [Lithosphere], no. 5, pp. 90–109. (*In Russ.*)
10. Ivanov K. S., Puchkov V. N., Fyodorov Yu. N., Erokhin Yu. V., Pogromskaya O. E. 2013, Tectonics of the Urals and adjacent part of the West-Siberian platform basement: Main features of geology and development. *Jouanal of Asian Earth Sciences*, vol. 72, pp. 12–24. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2013.02.029
11. Storz H., Storz W., Jacobs F. 2000, Electrical resistivity tomography to investigate geological structures of the earth's upper crust. *Geophysical Prospecting*, vol. 48, issue 3, pp. 455–471. https://doi.org/10.1046/j.1365-2478.2000.00196.x
12. Wisen R., Auken E., Dahlin T. 2005, Combination of ID laterally constrained inversion and 2D smooth inversion of resistivity data with a priori data from boreholes. *Near Surface Geophysics*, vol. 3, issue 2, pp. 71–79. https://doi.org/10.3997/1873-0604.2005002
13. Bobachev A. A., Yakovlev A. G., Yakovlev D. V. 2007, Electrotomography is high-resolution direct current electric exploration. *Inzhenernaya geologiya* [Engineering Geology World], no. 3, pp. 31–35. (*In Russ.*)
14. Apostolopoulos G. 2008, Comdined Schlumberger and dipole-dipole array for gydrogeologic applications. *Geophisics*, vol. 73, issue 5, pp. F187–F195. https://doi.org/10.1190/1.2950032
15. Arzhantseva I. A., Andreyev M. A., Akulenko S. A., Kats M. J., Modin I. N. 2009, Geophisical Investigations on Por-Bajin Island, Tuva (Russia). 8th Intern. Conf. on Archaeological Prospection (9–12 sept.). Paris, 4 p.
16. Prokin V. A., Necheukhin V. M., Sopko P. F. et al. 1985, *Mednokolchedannyye mestorozhdeniya Urala. Geologicheskiye usloviya razmeshcheniya* [Copper pyrite deposits of the Urals. Geological conditions of placing], Sverdlovsk, 288 p.

The article was received on May 14, 2019

* ✉ vmsap@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-9665-5778

УДК 550.424 https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-3-72-78

Геохимия донных отложений рек Красноуральского промузла

Михаил Викторович ШАБАНОВ*

Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, Россия, Санкт-Петербург

Актуальность работы. Добыча и переработка медного сырья в районе города Красноуральск Свердловской области привели к существенному загрязнению донных отложений поверхностных водотоков. Сточные воды и аэропромвыбросы попадают в аквальные системы и оказывают существенное влияние на химический состав донных отложений. Главными водными артериями в районе города Красноуральска, испытывающими значительное влияние на антропогенные нагрузки, являются реки Салда, Айва и их притоки.
Цель работы. Анализ содержания халькофильных, сидерофильных и литофильных элементов в донных отложениях поверхностных водотоков в зоне влияния медеплавильного комбината.
Методология исследований. Проведена количественная оценка содержания химических элементов в донных отложениях вблизи медеплавильного комбината на примере города Красноуральска.
Результаты. В ходе исследования установлено, что воздействие Красноуральского металлургического комбината негативно сказывается на химическом составе донных отложений. В донных отложениях фоновых водотоков (река Айва в верхнем течении) уровень загрязнения средний. Наиболее сложная ситуация в реках Кушайке, Сорье и Сорьинском хвостохранилище, в них выявлены геохимические аномалии. Ведущими элементами являются As, Cu, Pb, Zn, S, уровень загрязнения высокий и очень высокий. Основным источником поступления загрязняющих веществ является 5-й тупик, где происходит окисление руд и продукты разрушения поступают в поверхностные водотоки и Сорьинское хвостохранилище.
Выводы. Выявлены возрастающие концентрации исследуемых элементов As < Pb < Cu < S < Ba < Sr < Ni < Fe. В изученных водотоках обнаружены элементы, которые создают напряженную экологическую обстановку. По показателю суммарного загрязнения исследуемые водотоки характеризуются высоким и очень высоким уровнем загрязнения.

Ключевые слова: поверхностные воды, донные отложения, коэффициент накопления, суммарный показатель загрязнения.

Введение

Эколого-геологические проблемы горнорудных районов в настоящее время представляют большой интерес, так как добыча, переработка рудного сырья негативно сказываются на химическом составе водных объектов. Загрязняющие вещества поступают в окружающую среду с аэропромвыбросами, оседают на прилегающих водосборах, после выпадения атмосферных осадков они смываются в ближайшие водотоки. Наличие отвалов, хвостохранилищ, шламохранилищ способствует поступлению тяжелых металлов в водотоки[1–3]. Наиболее опасными загрязнителями окружающей среды признаны вещества химической природы, в том числе и тяжелые металлы [4].

Природные воды характеризуются определенными физико-химическими условиями. Часть металлов, поступая в воду, выпадает в осадок, либо концентрируется в донных отложениях илистыми частицами [5–7], либо мигрируют с водотоком и при изменении физико-химических условий образует комплексные соединения.

В результате такой трансформации природные гидрологические системы изменяются и переходят в техногенные гидрологические системы, которые перестраиваются и переходят на новый этап развития. Любые процессы трансформации экосистемы могут привести к необратимым изменениям в составе донных отложений. Они, с одной стороны, за счет адсорбции и обменных реакций способствуют самоочищению водной среды, с другой,– могут являться источником вторичного загрязнения воды.

Экосистемы Уральского региона чувствительны к антропогенным нагрузкам. ОАО «Святогор» сбрасывает свои стоки в поверхностные воды, а также загрязняет аэропромвыбросами водосборную территорию. Положение ухудшается выпадением кислотных дождей, которые взаимодействуют с токсичными отходами переработки и в виде мелких ручейков, образуя большие потоки, стекают в пониженные элементы рельефа, в дальнейшем они поступают в поверхностные воды, где начинается новый цикл для тяжелых металлов.

В связи с этим целью данной работы является изучение современного состояния донных отложений и содержания в них тяжелых металлов, а также их накопления на различных участках и на разном удалении от комбината. Основная задача исследований направлена на выявление геохимических аномалий, которые создают экологическую напряженность в районе исследования.

Материалы и методы

Объектом изучения являются донные отложения поверхностных водотоков. Отбор проб проведен в зонах аккумуляции и смешивания в летний период (июль) в соответствии с ГОСТ 17.1.5.01 [8].

В основу исследования положено изучение химического состава донных отложений. Донные отложения отбирали ковшовым методом в полиэтиленовые пакеты, высушивали при комнатной температуре и подвергали химическому анализу. Гранулометрический состав определяли по ГОСТу [9], химический состав донных отложений – на рентгеновском дифрактометре XRD 7000.

Исследования проводились на равнинной части бассейна среднего течения р. Салды. Основное питание река получает за счет главных притоков – рек Айвы, Ключевки, Кушайки и Нивы (рис. 1).

Река Салда берет начало на склоне горы Благодать, к востоку от города Кушвы, на высоте 250 м над уровнем моря. Протекает по территории Свердловской области, в основном по малозаселенной заболоченной местности, где почти не растет лес. У реки преобладает снеговое питание. Усредненный расход воды на расстоянии 36 км от устья – 11,5 м^3/с. Протекает по делювиальным отложениям (dlllsv) плейстоценового периода, верхнее звено – североуральский надгори-

* ✉ geohim@gmail.com
https://orcid.org/0000-0003-4725-3673

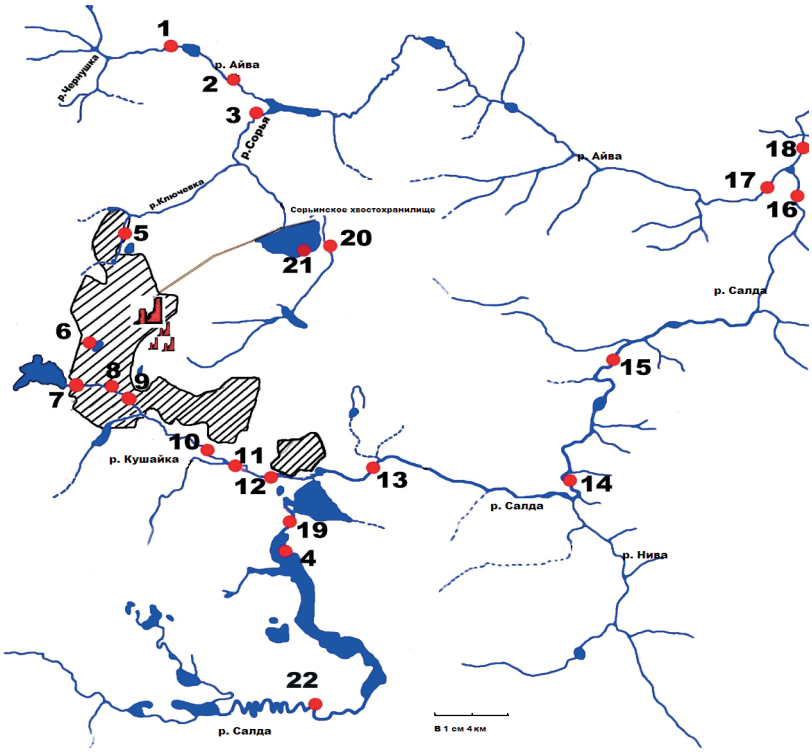


Рисунок 1. Изучаемая система водотоков, точки отбора проб.
Figure 1. The studied system of watercourses, sampling points.

зонт. Площадь водосбора 3670км^2. Средняя скорость течения (кроме перекатов) – 0,5 м/с. Глубины средние верховья/низовья вблизи устья – 1м.

Айва – левый приток Салды. Длина реки составляет 28 км. В верхнем течении протекает по элювиально-делювиальным отложениям (е, dlll-H), в среднем течении и в месте впадения в реку Салду по делювиальным отложениям (dlllsv) плейстоценового периода. Берега реки крутые, в понижениях заболоченные. В среднем течении берега смыты вследствие работы драги.

Притоки р. Айвы – р. Ключевка, которая протекает в черте города Красноуральска, ширина русла 0,5–0,6 м, глубина 0,2–0,5 м, и р. Сорья, которая берет свое начало в болотах, протяженность 3 км, ширина 5 м, глубина 1,2–1,5 м, протекает вдоль Сорьинского хвостохранилища. Берега пологие, песчаные.

Река Кушайка берет свое начало в городском пруду, берега крутые, глубина 0,5–1 м. Длина реки составляет 12 км.

Река Нива является правым притоком реки Салды. Общая протяженность составляет 19 км, площадь водосбора 135 км^2, глубина 1,2–1,5 м. Протекает сквозь березово-сосновый лес. Берега частично нарушены драгой.

Сорьинское хвостохранилище сформировано на северо-западе от завода. На исследуемой территории выделены фоновые водотоки, не подверженные техногенной нагрузке (точки 1, 2, 22 и 4), зоны смешивания (точки 8 и 9, 11 и 12, 17 и 18) и пункты, находящиеся в непосредственной близости от комбината.

Основные фоновые водотоки имеют постоянный ионный состав, вещества, поступающие из атмосферы с боковым стоком, трансформируются в результате внутренних процессов водотоков и водоемов.

В зонах смешивания происходит резкий скачок окислительно-восстановительного потенциала, изменяются физико-химические условия, что приводит к образованию новых веществ, которые напрямую или косвенно воздействуют на донные отложения.

Показатель pH донных отложений колеблется в широком диапазоне – от 2,49 до 7,25. В фоновых водотоках реакция среды преимущественно слабокислая. В донных отложениях Сорьинского хвостохранилища (точка 21) реакция среды кислая, в отложениях озер, находящихся в непосредственной близости от пруда (точка 20), реакция среды сильнокислая.

Кислая реакция среды донных отложений выявлена в точках 10 и 17, в эти водотоки попадают продукты кислотного гидролиза с близлежащих территорий, которые выпадают в осадок.

В составе донных отложений преимущественно присутствует псаммитовая фракция (табл. 1), в ней преобладают грубо- и среднезернистые пески, но грубозернистого песка меньше, максимум его в точке 4, в точках 11 и 21 преобладают мелко- и тонкозернистые пески. Алевролитовая и илистая фракции представлены в незначительном количестве, максимум алевролитовой фракции в точках 3, 12 и 20, на илистую фракцию приходится менее 7 %. В донных отложениях точек 2 и 19 преобладает грубообломочный материал размером более 10 мм.

Содержание пелитов и алевролитов отражает гидродинамический режим рек: чем больше скорость течения, тем меньше алевролитовой фракции и больше псаммитов.

Органическое вещество донных отложений играет активную роль в накоплении химических элементов. Из данных табл. 1 видно, что концентрация органического вещества отличается низким содержанием, что, очевидно, обусловлено гранулометрическим составом донных отложений, где преобладают грубозернистые и крупнозернистые пески. Наибольшее содержание органического вещества выявлено в точке 8. В остальных объектах его содержание не превышает 2,50 %.

Таблица 1. Гранулометрический состав донных отложений.
Figure 1. The studied system of watercourses, sampling points.

Точки отбора проб	pH	Органическое вещество, %	Размер частиц, мм								
			> 10	10–2	2–1	1–0,25	0,25–0,05	0,05–0,01	0,01–0,005	0,005–0,001	< 0,001
1	5,66	2,03	38,80	43,45	2,50	0,42	0,21	4,44	2,94	0,58	5,00
2	5,13	1,14	100,00	–	–	–	–	–	–	–	–
3	2,49	0,90	–	1,05	4,00	22,90	8,82	55,29	0,59	0,59	6,76
4	6,82	1,82	12,40	15,95	36,20	22,25	1,50	4,12	0,88	1,76	5,00
5	5,89	1,37	20,00	18,30	5,15	19,70	11,85	18,53	1,77	3,53	1,17
7	7,25	1,82	6,50	33,70	20,35	25,30	5,33	7,06	0,88	0,30	0,58
8	5,80	12,66	–	12,43	7,20	19,24	24,20	11,60	2,54	15,35	7,44
9	5,85	1,53	–	41,90	27,95	22,00	3,45	4,12	0,00	0,29	0,29
10	4,08	1,12	–	7,95	27,15	42,45	9,12	9,70	1,48	1,76	0,29
11	6,27	1,84	–	1,35	1,25	20,90	52,97	14,71	3,53	4,71	0,58
12	6,62	1,09	–	0,85	0,75	8,15	31,43	45,59	5,88	5,88	1,47
13	6,36	1,53	–	–	1,15	18,15	30,70	31,18	5,00	7,94	5,88
15	6,93	1,09	–	14,25	26,70	42,75	7,18	7,65	–	1,47	–
16	5,62	2,15	12,30	15,55	19,30	20,50	23,23	7,94	0,29	0,88	–
17	4,55	1,68	–	1,65	11,30	66,55	16,38	3,53	–	0,58	–
18	5,32	1,24	24,55	7,00	3,75	15,00	16,76	28,82	0,30	2,35	1,47
19	5,50	1,65	100,00	–	–	–	–	–	–	–	–
20	2,75	1,12	–	–	–	1,05	12,48	82,95	0,30	3,22	–
21	4,86	0,99	5,40	74,85	15,45	2,75	64,08	2,32	–	–	–
22	5,75	1,72	–	1,60	2,90	29,10	24,93	17,06	9,41	11,18	3,82

Для характеристики содержания химических элементов в донных отложениях использовались данные среднего содержания микроэлементов в донных отложениях Уральского региона [10] и кларки химических элементов, по Виноградову, в литосфере [11].

Содержания халькофильных, литофильных и сидерофильных элементов в отложениях изученных водотоков представлены в табл. 2, в распределении их по течению рек наблюдается определенная неравномерность.

В фоновых водотоках (река Айва, точка 1, и в верхнем течении реки Салды, точка 22) содержание халькофильных элементов незначительно превышает фоновое. Высокие концентрации выявлены для цинка и свинца (точка 1), цинка и меди (точка 22). Для литофильных элементов только для стронция и бария (точка 1) и по хрому (точка 22). Незначительное превышение обуславливается не только природными геохимическими процессами, но и распространяющимися на значительное расстояние аэропромвыбросами комбината. Кроме перечисленных факторов, на накопление элементов существенное влияние оказывает гранулометрический состав отложений. Преобладание мелких фракций способствует сорбции тяжелых металлов, что также отражено в [12]. Сидерофильные элементы не превышают фоновое и кларковое содержание.

Для характеристики техногенных геохимических ассоциаций в донных отложениях рассчитаны коэффициент концентрации K_c(табл. 3) [13], коэффициент накопления R_x Р. Моксхэма, показатель $N_э$, характеризующий количественный состав техногенной геохимической ассоциации и отражающий число входящих в нее химических элементов [14], и суммарный показатель химического загрязнения Z_c.

Как видно из данных табл. 3, активнее всего происходит накопление стронция, бария и свинца (точка 1), а также кобальта для точки 22. По показателю суммарного загрязнения фоновые водотоки относятся к среднему уровню загрязнения [15].

Основным источником поступления элементов в поверхностные водотоки являются отвалы пород вблизи станции «Медь» на западной окраине города, откуда после выпадения атмосферных осадков продукты окисления руд в ионной форме с временными русловыми потоками транспортируются в пониженные элементы рельефа.

В реке Кушайке установлено наивысшее содержание халькофильных элементов (точки 7, 8, 9 и 10), превышение относительно фонового содержания составляет сотни раз. Литофильные элементы, такие как стронций и барий, незначительно превышают фон. Данные табл. 3 свидетельствуют, что в реке Кушайке активнее всего накапливаются медь, мышьяк, свинец, сера, цинк, а также кобальт. Показатель суммарного загрязнения свидетельствует об очень высоком уровне загрязнения (точка 8) и высоком (точки 7, 9 и 10). Вниз по течению при впадении в реку Салду происходит разбавление концентрации металлов, часть сорбируется гидроксидами железа и уносится дальше. В этих точках (13, 15 и 16) – незначительное превышение концентрации халькофильных элементов.Сорьинское хвостохранилище (точка 21) организовано в пойме реки Сорьи путем возведения плотины из суглинка и предназначено для складирования хвостовой пульпы, площадь хвостохранилища 500 га. Из хвостохранилища дебалансовые воды попадают в реку Сорью [16]. Ведущими элементами донных отложений являются As, Pb, Ba, Co, Sr и S, уровень загрязнения очень высокий. Тонкая взвесь хвостохранилища попадает в реку Сорью. Мелкие пруды вокруг хвостохранилища, возникающие в пониженных элементах рельефа за счет скапливающейся влаги, поступающей с откосов хвостохранилища (точка 20), характеризуются накоплением Pb, As, Ba, Co и Cu, уровень загрязнения высокий. В жаркое лето они пересыхают, и тонкодисперсные частицы ветром развеваются на близлежащие ландшафты.

Еще один объект, расположенный на значительном расстоянии от источника загрязнения (точка 4),– Красноуральское водохранилище, донные отложения также характеризуются геохимически аномальным содержанием элементов. Ведущими химическими элементами являются Pb, As, Zn и Ba. Уровень загрязнения высокий. Такое содержание, возможно, связано со строительством дамбы, где использовались породы, содержащие сульфидные руды.

Таблица 2. Химический состав донных отложений.
Table 2. The chemical composition of bed deposits.

Элемент	Кларк[1] / Фон	Точки отбора проб																			
		1	2	3	4	5	7	8	9	10	11	12	13	15	16	17	18	19	20	21	22
Si	29,50 / *	27,9	25,01	18,19	25,56	30,53	1,56	11,79	24,94	28,25	25,04	27,23	26,75	26,26	36,64	26,84	26,34	26,11	21,33	28,35	26,87
Al	8,05 / *	8,04	8,84	5,77	6,39	7,81	0,92	7,77	8,06	9,96	9,73	9,57	10,68	7,74	11,27	8,33	8,17	10,39	6,68	10,52	10,07
Fe	4,65 / *	4,99	5,83	11,98	13,65	4,14	1,97	11,88	10,10	7,97	6,76	5,19	6,09	6,24	6,64	9,49	8,70	6,60	12,04	12,86	5,77
Ca	2,96 / *	3,62	3,44	0,59	2,63	1,49	29,97	0,86	2,33	3,70	2,31	1,61	1,59	2,70	4,18	2,79	2,45	1,54	1,09	5,97	1,92
K	2,50 / *	2,48	1,96	1,51	1,04	1,33	0,03	0,72	1,52	2,44	1,86	1,92	1,72	1,27	2,11	1,32	1,28	2,15	1,70	2,81	1,96
Na	2,50 / *	2,39	3,46	0,69	1,33	1,27	0,08	0,36	1,15	2,75	1,45	1,03	1,10	1,75	2,16	1,43	1,59	0,95	0,93	3,28	1,20
Mg	1,87 / *	0,72	0,85	0,51	0,82	0,83	0,80	0,40	0,93	1,21	0,99	1,57	1,24	3,65	1,72	1,15	1,16	0,98	0,77	2,89	1,58
Ti	0,60 / *	0,32	0,32	0,23	0,21	0,33	0,03	0,17	0,37	0,62	0,46	0,48	0,44	0,34	0,69	0,47	0,38	0,55	0,35	0,68	0,39
Mn	0,10 / *	0,10	0,27	0,02	0,21	0,06	0,04	0,04	0,15	0,13	0,08	0,15	0,23	0,18	0,16	0,09	0,07	0,17	0,03	0,22	0,11
Sr	* / 0,00227	0,09	0,05	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,04	0,07	0,04	0,02	0,03	0,04	0,07	0,04	0,04	0,03	0,04	0,07	0,05
Ba	* / 0,00223	0,08	0,05	0,19	0,14	0,02	0,02	–	0,07	0,07	0,05	0,06	0,05	0,04	0,09	0,07	0,07	0,06	0,19	0,07	0,06
S	0,047 / *	0,03	0,85	4,64	0,42	0,06	3,76	1,70	0,17	0,07	0,16	0,02	0,04	0,02	0,19	0,50	0,44	0,11	4,24	0,75	0,04
Cr	* / 0,0247	0,02	0,04	0,01	0,06	0,05	0,009	0,01	0,04	0,02	0,02	0,06	0,02	1,04	0,17	0,11	0,07	0,03	0,01	0,02	0,04
Zn	* / 0,0073	0,01	0,02	0,14	1,23	0,06	0,17	0,84	0,43	0,04	0,24	0,01	0,07	0,02	0,10	0,03	0,03	0,02	0,07	0,06	0,02
Cu	* / 0,0038	0,008	0,04	0,09	0,16	0,02	0,15	13,44	0,29	0,01	0,08	0,008	0,03	0,01	0,01	0,04	0,04	0,01	0,08	0,05	0,01
Ni	* / 0,0037	0,006	0,006	0,006	0,009	0,008	0,005	0,01	0,01	0,008	0,009	0,02	0,01	0,04	0,02	0,01	0,01	0,01	0,005	0,007	0,02
Pb	0,00016 / *	0,003	–	0,06	0,07	0,005	0,007	0,03	0,02	0,005	0,007	0,002	0,004	–	–	0,01	0,01	0,003	0,08	0,02	0,002
Ga	0,0013 / *	0,002	0,002	0,002	0,003	0,002	0,0008	–	0,002	0,002	0,003	0,002	0,003	0,002	0,003	0,002	0,003	0,002	0,003	0,003	0,002
Co	0,0008 / *	–	0,02	–	–	–	0,0049	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,03	0,02
As	* / 0,00017	–	–	0,12	0,04	–	–	0,04	0,02	0,007	0,006	–	–	–	–	0,11	0,12	0,004	0,04	0,09	–
Se	* / 0,00227	–	–	0,002	–	–	–	–	–	–	–	–	0,0007	–	–	–	0,0006	–	0,002	–	–
Zr	0,002 / *	–	–	–	0,009	0,01	–	0,01	0,02	–	0,02	0,02	0,02	0,02	0,05	0,01	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01

[1]В числителе кларковое содержание, в знаменателе фоновое содержание.

Таблица 3. Геохимические ассоциации в донных отложениях.
Table 3. Geochemical associations in bed deposits.

Точки отбора проб	Значения K_c химических элементов	$N_э$	R_x	Z_c	Уровень загрязнения
1	Sr_{39}–Ba_{35}–Pb_{18}–$(Cu–Ni)_2$	5	19,59	24,49	Средний
2	Co_{25}–$(Sr–Ba)_{22}$–S_{18}–Cu_{10}–$(Zn–Mn)_3(Cr–Ni)_2$	9	11,85	13,33	Средний
3	As_{700}–Pb_{375}–S_{98}–Ba_{85}–Cu_{24}–Zn_{19}–Sr_9–Fe_3–Ni_2	9	146,64	165,09	Очень высокий
4	Pb_{437}–As_{235}–Zn_{168}–Ba_{62}–$(Sr–S)_9$–Zr_5–Fe_3–$(Ni–Mn–Cr)_2$	11	85,10	93,64	Высокий
5	Pb_{31}–$(Sr–Ba)_9$–Zn_8–$(Cu–Zr)_5$–$(Ni–Cr)_2$	8	7,67	10,24	Допустимый
7	As_{294}–S_{80}–Pb_{43}–Cu_{39}–Zn_{23}–Ca_{10}–Ba_9–Co_6–Sr_4	9	56,69	63,78	Высокий
8	Cu_{3536}–Pb_{187}–Zn_{115}–Co_{37}–S_{36}–Zr_5–Sr_4–Ni_3–$(Fe–Y)_2$	10	392,98	436,65	Очень высокий
9	As_{235}–Pb_{125}–Cu_{76}–Zn_{58}–Ba_{31}–Co_{25}–Sr_{17}–Zr_{10}–$(S–Ni)_3$–$(Fe–Cr–Y)_2$	13	45,48	49,27	Высокий
10	As_{117}–$(Pb–Ba)_{31}$–Sr_{30}–Co_{25}–Zn_5–$(Cu–Ni)_2$	8	30,79	35,19	Высокий
11	Pb_{43}–As_{41}–Zn_{32}–Ba_{22}–Cu_{21}–Sr_{17}–Co_{12}–Zr_{10}–S_3–$(Ni–Ga)_2$	11	18,27	20,75	Средний
12	Ba_{26}–$(Pb–Co)_{12}$–Zr_{10}–Sr_9–Ni_5–$(Cu–Cr)_2$	8	10,07	11,52	Средний
13	$(Co–Pb)_{25}$–Ba_{22}–Sr_{13}–Zr_{10}–Zn_9–Cu_7–Ni_3–Y_2	9	13,05	14,68	Средний
15	Cr_{42}–Co_{25}–$(Ba–Sr)_{17}$–$(Ni–Zr)_{10}$–$(Zn–Cu–Mg)_2$	9	14,53	16,34	Средний
16	Ba_{40}–Sr_{30}–Zr_{25}–Zn_{13}–Co_{12}–Cr_7–Ni_5–S_4–Y_3	9	15,71	19,22	Средний
17	As_{647}–Pb_{62}–Ba_{31}–Sr_{17}–Co_{12}–$(Zr–S–Cu)_{10}$–Cr_4–$(Fe–Ni)_2$	11	73,76	81,14	Высокий
18	As_{705}–Pb_{62}–Ba_{31}–Co_{25}– Sr_{17}–Cu_{10}–S_9– Zr_5–Zn_4–Ni_3–Fe_2	11	79,55	87,60	Высокий
19	Ba_{26}–Co_{25}–As_{23}–Pb_{18}–Zr_{15}–Sr_{13}–Ni_3–$(Zn–Cu–S)_2$	10	13,28	14,75	Средний
20	Pb_{500}–As_{235}–Ba_{85}–Co_{37}–Cu_{21}–Sr_{17}–Zn_{10}–S_9–Zr_5–$(Fe–Ga)_2$	11	84,12	92,53	Высокий
21	As_{529}–Pb_{125}–Co_{37}–Ba_{31}–Sr_{30}–S_{15}–Cu_{13}–Zn_8–Zr_{10}–Fe_3–$(Ni–Ga)_2$	12	67,36	73,49	Высокий
22	Ba_{26}–Co_{25}–Sr_{22}–Pb_{12}–$(Ni–Zr)_5$–Zn_3–Cu_2	8	9,64	14,59	Средний

Кс – коэффициент концентрации химического элемента; Nэ – количественный состав техногенной геохимической ассоциации; Rx – коэффициент Р.Моксхэма; Zc – суммарный показатель химического загрязнения.
Kc – concentration coefficient of the chemical element; Nэ – is the quantitative composition of the technogenic geochemical association; Rx – R. Moxham coefficient; Zc – the total indicator of chemical pollution.

Выводы

1. В составе донных отложении преобладает псаммитовая фракция (грубо- и среднезернистые пески). Алевролитовая и илистая фракции представлены в незначительном количестве. Содержание органического вещества в пределах 2,50–13,0 %. Реакция среды донных отложений слабокислая, и только в отложениях, подверженных техногенному воздействию, – кислая и сильнокислая.

2. В районе воздействия Красноуральского медеплавильного комбината изученные элементы образуют возрастающие ряды по их среднему содержанию в изученных водотоках As < Pb < Cu < S < Ba < Sr < Ni < Fe. Полученные данные свидетельствуют о слабой самоочищающей способности рек в зоне техногенеза.

3. Геохимическое зонирование рек выявило металлы, которые создают напряженную экологическую обстановку на исследуемой территории для рек Кушайки – Cu, As, Pb, S, Zn; Сорьи – As, Pb, S, Ba и технологического пруда – As, Pb, Ba, Co, Sr, S. В фоновых водотоках Zn, Pb и Cu.

4. Донные отложения рек Кушайки, Сорьи и технологического пруда по показателю суммарного загрязнения характеризуются высоким и очень высоким уровнем загрязнения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Yu K. C., Chang C. Y., Tsai L. J., Ho S. T. Multivariate analyses on heavy metal binding fractions of river sediments in Southern Taiwan // Water Sci. Technol. 2000. Vol. 42, issue 7–8. P. 193–199. https://doi.org/10.2166/wst.2000.0569
2. Demirezen D., Aksoy A. Accumulation of heavy metals in Typha angustifolia (L.) and Potamogeton pectinatus (L.) living in Sultan Marsh (Kayseri, Turkey) // Chemosphere. 2004. Vol. 56, issue 7. P. 685–696. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2004.04.011
3. Sasmaz A., Obek E., Hasar H. The accumulation of heavy metals in Typha latifolia L. grown in a stream carrying secondary effluent // Ecological Engineering. 2008. Vol. 33. P. 278–284.
4. Трапезников А. В. Радиоэкология пресноводных экосистем (на примере Уральского региона): автореф. дис. … д-ра биол. наук. Екатеринбург, 2001. 48 с.
5. Nelson S. M., Roline R. A., Thullen J. S., Sartoris J. J., Boutwell J. E. Invertebrate assemblages and trace element bioaccumulation associated with constructed wetlands // Wetlands. 2000. Vol. 20, issue 2. P. 406–415. https://doi.org/10.1672/0277-5212(2000)020[0406:IAATEB]2.0.CO;2
6. Hollert H., Keiter S., König N., Rudolf M., Ulrich M., Braunbeck T. A new sediment contact assay to assess particle-bound pollutants using zebrafish (danio rerio) embryos // Journal of Soils and Sediments. 2003. Vol. 3. P. 197–207. https://doi.org/10.1065/jss2003.09.085
7. Audry S., Schäfer J., Blanc G., Jouanneau J. M. Fifty-year sedimentary record of heavy metal pollution (Cd, Zn, Cu, Pb) in the Lot River reservoirs (France) // Environmental Pollution. 2004. Vol. 132, issue 3. P. 413–426. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2004.05.025
8. ГОСТ 17.1.5.01–80. Охрана природы. Гидросфера. Общие требования к отбору проб донных отложений водных объектов для анализа на загрязненность. Введ. 01.01.82. М.: Изд-во стандартов, 1980.
9. ГОСТ 12536–79. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава. Введ. 01.07.80. М.: Изд-во стандартов, 1979.
10. Попов Б. А., Лучинин И. Л., Гузовский Я. А., Болсун В. М., Гуткин В. Е., Петров В. Я. Геохимический атлас Среднего и Южного Урала // В. И. Вернадский и современные проблемы геологии (в ознаменование 125-летия со дня рождения В. И. Вернадского). Свердловск, 1988, С. 4–5.

11. Виноградов А. П. Среднее содержание химических элементов в главных типах изверженных пород земной коры // Геохимия. 1962. № 7. С. 555–571.
12. Мур Дж., Рамамурти С. Тяжелые металлы в природных водах. М.: Мир, 1987. 286 с.
13. Сает Ю. Е., Алексинская Л. Н., Янин Е. П. Методические рекомендации по геохимической оценке загрязнения поверхностных водотоков химическими элементами. М.: ИМГРЭ, 1982. 74 с.
14. Moxham R. L. Minor element distribution in some metamorphic pyroxenes // Can. Mineral. 1960. Vol. 6. P. 522–545.
15. Сает Ю. А. Антропогенные геохимические аномалии (особенности, методика изучения и экологическое значение): автореф. дис. … д-ра геол.-минерал. наук. М.: ИМГРЭ, 1982. 53 с.
16. Бичукина И. А., Парфенова Л. П., Копенкина О. А. Факторы формирования геоэкологических условий территории Сорьинского хвостохранилища // Горный журнал. 2008. № 8. С. 192–194.

Статья принята в редакцию 22 января 2019 г.

УДК 550.424 https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-3-72-78

Geochemistry of rivers bed deposits of the Krasnouralsk industrial hub

Mikhail Viktorovich SHABANOV*

Saint-Petersburg State Agrarian University, Saint-Petersburg, Russia

Relevance of the work. Extraction and processing of copper raw materials in the area of the town of Krasnouralsk, Sverdlovsk Region, led to significant pollution of bed deposits of open watercourses. Wastewater and airborne emissions enter aquatic systems and have a significant effect on the chemical composition of bed deposits. The main waterways in the area of the town of Krasnouralsk, which have a significant impact on anthropogenic pressures, are the Salda, the Ayva and their tributaries.
Purpose. Analysis of the content of chalcophilic, siderophilic and lithophilic elements in the bed deposits of open watercourses in the zone of influence of the copper smelter.
Research methodology. A quantitative assessment of the content of chemical elements in bed deposits near a copper smelter was carried out using the example of the town of Krasnouralsk.
Results The study found that the impact of the Krasnouralsk metallurgical complex negatively affects the chemical composition of bed deposits. In the bed deposits of regional watercourses (the Ayva river in the upstrem), the level of pollution is average. The most difficult situation in the rivers Kushayka, Sorye and Sorya tailings, they revealed geochemical anomalies. The leading elements are As, Cu, Pb, Zn, S, the level of pollution is high and very high. The main source of pollutants is the 5th dead end, where ore is oxidized and the products of destruction enter the surface streams and the Sorya tailing dump.
Conclusions. Increasing concentrations of the studied elements As < Pb < Cu < S < Ba < Sr < Ni < Fe were revealed. In the studied watercourses, elements have been discovered that create a tense ecological situation. In terms of total pollution, the studied streams are characterized by high and very high levels of pollution.

Keywords: open water, bed deposits, accumulation factor, consolidated figures for pollution.

REFERENCES

1. Yu K. C., Chang C. Y., Tsai L. J., Ho S. T. 2000, Multivariate analyses on heavy metal binding fractions of river sediments in Southern Taiwan. *Water Sci. Technol.*, vol. 42, issue 7–8, pp. 193–199. https://doi.org/10.2166/wst.2000.0569
2. Demirezen D., Aksoy A. 2004, Accumulation of heavy metals in Typha angustifolia (L.) and Potamogeton pectinatus (L.) living in Sultan Marsh (Kayseri, Turkey). *Chemosphere*, vol. 56, issue 7, pp. 685–696. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2004.04.011
3. Sasmaz A., Obek E., Hasar H. 2008, The accumulation of heavy metals in Typha latifolia L. grown in a stream carrying secondary effluent. *Ecological Engineering*, vol. 33, pp. 278–284.
4. Trapeznikov A. V. 2001, *Radioekologiya presnovodnykh ekosistem (na primere Ural'skogo regiona)* [Radioecology of freshwater ecosystems (case study of the Ural region)], PhD thesis, Ekaterinburg, 48 p.
5. Nelson S. M., Roline R. A., Thullen J. S., Sartoris J. J., Boutwell J. E. 2000, Invertebrate assemblages and trace element bioaccumulation associated with constructed wetlands. *Wetlands*, vol. 20, issue 2, pp. 406–415. https://doi.org/10.1672/0277-5212(2000)020[0406:IAATEB]2.0.CO;2
6. Hollert H., Keiter S., König N., Rudolf M., Ulrich M., Braunbeck T. 2003, A new sediment contact assay to assess particle-bound pollutants using zebrafish (danio rerio) embryos. *Journal of Soils and Sediments*, vol. 3, pp. 197–207. https://doi.org/10.1065/jss2003.09.085
7. Audry S., Schäfer J., Blanc G., Jouanneau J. M. 2004, Fifty-year sedimentary record of heavy metal pollution (Cd, Zn, Cu, Pb) in the Lot River reservoirs (France). *Environmental Pollution*, vol. 132, issue 3, pp. 413–426. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2004.05.025
8. 1980, GOST 17.1.5.01–80. Protection of Nature. Hydrosphere. General requirements for sampling of bottom sediments of water bodies for analysis of pollution. Moscow.
9. 1979, GOST 12536–79. Soils. Laboratory methods for determination of particle size (grain) and microaggregate composition. Moscow.
10. Popov B. A., Luchinin I. L., Guzovskiy YA. A., Bolsun V. M., Gutkin V. Ye., Petrov V. YA. 1988, *Geokhimicheskiy atlas Srednego i Yuzhnogo Urala* [Geochemical atlas of the Middle and Southern Urals], V. I. Vernadsky and modern issues of geology (to commemorate the 125th anniversary of the birth of V. I. Vernadsky). Sverdlovsk, pp. 4–5.
11. Vinogradov A. P. 1962, Average content of chemical elements in the main types of igneous rocks of the earth's crust. *Geokhimiya* [Geochemistry], no. 7, pp. 555–571. (*In Russ.*)
12. Moore J., Ramamurti S. 1987, *Tyazhelyye metally v prirodnykh vodakh* [Heavy metals in natural waters]. Moscow, 286 p.
13. Saet Yu. E., Aleksinskaya L. N., Yanin E. P. 1982, *Metodicheskiye rekomendatsii po geokhimicheskoy otsenke zagryazneniya poverkhnostnykh vodotokov khimicheskimi elementami* [Guidelines for the geochemical evaluation of pollution of surface watercourses by chemical elements]. Moscow, 74 p.
14. Moxham R. L. 1960, Minor element distribution in some metamorphic pyroxenes. *Can. Mineral*., vol. 6, pp. 522–545.
15. Sayet YU. A. 1982, *Antropogennyye geokhimicheskiye anomalii (osobennosti, metodika izucheniya i ekologicheskoye znacheniye*) [Anthropogenic geochemical anomalies (features, methods of study and environmental significance)], PhD thesis, Moscow, 53 p.
16. Bichukina I. A., Parfenova L. P., Kopenkina O. A. 2008, Factors of the formation of geoecological conditions of the territory of the Sorya tailings dam. *Gornyy zhurnal* [Mining journal], no. 8, pp. 192–194. (*In Russ.*)

The article was received on January 22, 2019

* geohim@gmail.com
https://orcid.org/0000-0003-4725-3673

УДК 517.91/.93 + 517.95 + 550.34 + 550.34.01 + 550.344.6 https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-3-79-89

Метод связи каналов в теории экзогенных геофизических систем

Виктор Борисович СУРНЕВ[1, 2 *],
Вера Борисовна ПЯТКОВА[1],
Дмитрий Владимирович ИСЛАМГАЛИЕВ[1]

[1] Уральский государственный горный университет, Россия, Екатеринбург
[2] Уральский федеральный университет, Россия, Екатеринбург

Актуальность работы. По оценкам специалистов Россия обладает весьма значительными запасами высоковязких нефтей (около 7 миллиардов тонн), добыча которой производится посредством теплового разогрева содержимого ловушки или пласта перегретым водяным паром с последующей откачкой получившегося флюида. Процесс добычи высоковязкой нефти, однако, является достаточно трудоёмким. По названным причинам разработка методов мониторинга добычи высоковязкой нефти актуальна.
Цель работы. Разработка теоретических основ сейсмического мониторинга процесса добычи высовязкой нефти.
Методология рассматриваемой в данной статье теории основана на постулате о двухканальном характере процесса взаимодействия ограниченного объекта (системы) с внешним миром. Через первый канал производится воздействие на объект векторного волнового поля, в данной работе – это упругое волновое поле. Через второй канал производится воздействие на объект стационарного скалярного поля, в данной работе – это тепловое поле. Таким образом, рассматривается теория рассеяния упругих волн объектом, находящимся под воздействием внешнего скалярного (теплового) поля. Скалярное поле в материале объекта индуцирует предварительные упругие напряжения, которые фигурируют как отклик объекта на это воздействие. Вторичное тепловое поле, существующее во внешности объекта, не рассматривается. Таким образом, общая самосогласованная задача двухканального взаимодействия объекта с внешним полем подвергается процедуре расцепления каналов и сводится к рассеянию упругой волны объектом с материальными параметрами, функционально зависящими от внешнего теплового воздействия, то есть общая нелинейная физическая система с распределёнными параметрами "объект – волновое поле – скалярное поле" рассматривается как параметрическая система, что позволяет существенно упростить алгоритм и уменьшить требуемые для численного моделирования ресурсы.
В качестве модельной задачи для теории, которую предполагается довести до практической реализации в виде алгоритма и комплекса вычислительных программ, выбрана важная для промысловой и разведочной геофизики задача сейсмического мониторинга состояния ловушки с высоковязкой нефтью при разогреве ловушки подводимым извне теплом. Авторы предполагают в дальнейшем обобщить теорию, разработать алгоритм и создать комплекс вычислительных программ электромагнитного мониторинга состояния объекта, находящегося под воздействием внешнего скалярного (теплового) поля, а также теорию взаимодействия объекта с внешним миром посредством нескольких каналов. Для более полного мониторинга процесса его математическую модель следует обобщить до существенно многоканального уровня, то есть рассмотреть математическую модель "объект – упругое волновое поле – электромагнитное волновое поле – тепловое поле – поле статического нагружения". Обобщённая на несколько полей теория многоканального взаимодействия объекта с внешним миром может быть использована и для математического моделирования в других областях физики и техники, например, в дефектоскопии.
Результаты. В статье разработана теория индуцирования предварительных напряжений в материале изучаемого объекта под действием внешнего скалярного (теплового) поля. Получены новые математические выражения для параметрических зависимостей материальных параметров объекта от температуры. Приведена обобщённая форма интегрального аналога уравнения Липмана-Швингера для решения прямой задачи рассеяния упругих волн объектом с предварительными напряжениями, индуцированными в материале объекта посредством воздействия на него внешнего теплового поля.

Ключевые слова: рассеяния теория; упругие волны; сейсмические волны; предварительные напряжения; высоковязкие нефти; сейсмический контроль; математическое моделирование; Липмана-Швингера уравнение; интегральные уравнения.

Введение

Экзогенные параметрические системы как нулевое приближение метода связи каналов

Объектом исследования данной статьи является весьма общая математическая модель гетерогенной упругой среды, находящейся под воздействием внешних по отношению к рассматриваемому объему среды возмущений, часть которых приводит к зависимости материальных параметров системы от внешних воздействий. Рассматривается гетерогенная среда, взаимодействующая с упругими волнами от внешнего по отношению к рассматриваемому ее объему источника. Практический интерес представляет случай, когда на исследуемый объем среды действует еще внешнее дополнительное возмущение, приводящее к изменению материальных параметров заключенной в объеме среды. Таким возмущением может выступать, например, тепловой поток.

Уместно отметить, что исследуемая в статье математическая модель имеет большое значение как для геологии вообще, так и для геофизики в частности, например, для сейсмологии и динамической сейсморазведки. В качестве модельной задачи для рассматриваемой теории в данной статье выбрана задача сейсмического контроля процесса добычи высоковязкой нефти в промысловой геофизике. Объектом исследования является модель нефтяной ловушки с высоковязкой нефтью, взаимодействующей с внешними искусственными сейсмическим и тепловым полями.

С точки зрения общей теории систем, рассматриваемая в данной статье модель гетерогенной упругой среды, взаимодействующей с внешним упругим волновым полем, является моделью экзогенной параметрической системы с распределенными структурными параметрами, взаимодействие которой с внешним миром осуществляется посредством двухканального процесса. Объектом исследования служит выделенный объем среды. Через условно первый канал осуществляется механическое взаимодействие объекта с внешним миром посредством падающих на объем среды упругих волн. Через условно второй канал осуществляется композиционное воздействие на структурные параметры системы посредством теплового потока извне. При этом физический смысл каналов может быть описан так:

* sournev@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0001-6534-6668
** vera.pytkova@m.ursmu.ru
*** dif1205@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-4222-9458

1-й канал: на вход системы подается механическое воздействие (упругая волна), на выходе регистрируется также механический отклик (упругая волна);

2-й канал: на вход системы подается немеханическое воздействие (тепловой поток), на выходе регистрируется также немеханический отклик (тепловой поток).

С физической точки зрения, очевидно, что между обоими каналами взаимодействия существует обратная связь, следствием которой является необходимость решения, в общем случае математически нелинейной (самосогласованной) задачи нестационарной термоупругости.

Указанная задача является нелинейной и, следовательно, алгоритм ее решения достаточно сложен в реализации. По этой причине представляется оправданным ввести некоторые упрощающие предположения, а именно: для упрощения алгоритма численного моделирования уместно «разорвать связь» указанных каналов, отказавшись от самосогласованности и оставить только «одностороннюю связь», т. е. рассматривать связь, направленную от одного канала к другому, но не наоборот.

С физической точки зрения такую процедуру «расцепления каналов взаимодействия» можно оправдать, если каналы воздействия на исследуемый объект технически возможно подразделить условно на основной (сильный) канал и на вспомогательный (слабый) канал. Сильный канал «управляет», например, откликом системы как целого на внешнее механическое воздействие, а слабый канал «управляет» изменением структурных параметров системы под влиянием внешних воздействий немеханической природы и тем самым вносит «поправки», возможно, существенные, в механический отклик системы, причем немеханический отклик системы является весьма малым, не имеет существенного значения для наблюдателя и на выходе системы не регистрируется.

Описанная ранее процедура расцепления каналов взаимодействия системы с внешним миром может быть охарактеризована как нулевое приближение в методе связи каналов и переводит общую нелинейную математическую модель системы в класс параметрических моделей, что значительно упрощает разработку и реализацию алгоритмов расчетов. Таким образом, в рамках параметрической модели взаимодействие системы с внешним миром происходит через слабый и сильный каналы связи, а частичная самосогласованность учитывается посредством вводимых специальным образом процедур изменения параметров системы под действием слабого канала.

Акценты и связь с предыдущими работами

Описанную ситуацию иллюстрирует рис. 1, из которого видно, что на входе системы имеется два канала воздействия, а на выходе учитывается фактически один канал отклика.

Известно, что математическое моделирование исследуемого явления в общем случае подразделяется на три основных стадии [1]:

1) разработка математической модели объекта исследования;

2) разработка математической модели процесса эволюции объекта;

3) решение основной задачи исследования.

В данной статье внимание акцентировано в основном на первой и второй стадиях математического моделирования рассеяния упругих волн гетерогенной средой, испытывающей внешние воздействия немеханической природы, а именно, важнейшей для теоретического описания задаче элементарного акта рассеяния волн уединенной неоднородностью [2–4] с учетом возможного немеханического, в данном исследовании теплового воздействия.

Формально данная статья продолжает и развивает на новом уровне понимания механизма внешних воздействий на систему идеи предшествующей работы [4], в которой трактовалась теория взаимодействия предварительно напряженного упругого объекта с внешней средой. В работе [4], однако, физический механизм возникновения в материале рассеивающего объекта предварительных напряжений не конкретизировался, а сама теория была ограничена только линейным приближением, без каких-либо обоснований последнего. В данной работе без нарушения общности внимание акцентируется на одном из возможных вариантов физического механизма возникновения в материале рассеи-

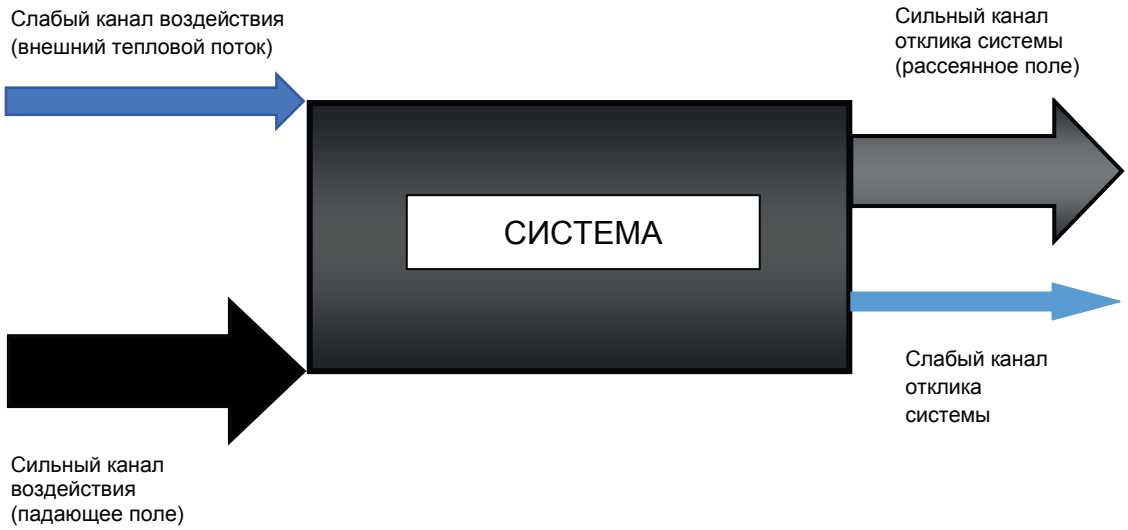


Рисунок 1. Каналы взаимодействия системы с внешним миром.
Figure 1. Channels of interaction between the system and the outside world.

вающего объекта предварительных напряжений – тепловом воздействии на объект, который реализуется на практике в некоторых задачах разведочной и промысловой геофизики. Построенный математический аппарат, трактуя отклик объекта на совместное воздействие – механическое и немеханическое – как двухканальный процесс легко обобщается на случай большего числа экзогенных воздействий на параметры объекта и может быть непосредственно использован также для описания других физических механизмов возникновения предварительных напряжений в материале объекта, следующих из общих законов термодинамики [1]. Таким образом, данная работа, будучи формально обобщением идей и методов работы [4], использует понятия и терминологию указанной работы, но является по существу полностью самостоятельным исследованием.

Пример экзогенной системы, актуальной для промысловой геофизики

В качестве обоснования актуальности и практической значимости модели гетерогенной среды, исследуемой в данной работе, приведем только один пример системы, взаимодействующей с внешней средой посредством двух каналов.

В работах [5–10] отмечается, что «в связи с исчерпанием запасов легких нефтей в мировой добыче в последние годы увеличивается доля трудноизвлекаемых нефтей с аномальными физическими свойствами, в частности с высокой вязкостью». Из приведенных в работе [5] данных следует, что такие нефти составляют десятую часть мировой добычи, которая ежегодно возрастает, и при сохранении темпов приращения добычи на существующем уровне прогнозируется увеличение добычи трудноизвлекаемой нефти в мире к 2030 г. в четыре раза. Там же указано, что Россия обладает весьма значительными запасами вязких нефтей, около 7 млрд т. Традиционными районами добычи таких нефтей являются Западная Сибирь, Северный Кавказ, Урало-Поволжье, Тимано-Печора, причем наряду с увеличением доли добычи трудноизвлекаемых нефтей с высокой вязкостью наблюдается увеличение глубины залегания продуктивных пластов, ухудшение коллекторов и усложнение геологического строения. Интерес к высоковязким нефтям увеличивается по мере роста цен на нефть и в связи с начавшимся периодом истощения многих крупных и мелких российских нефтяных месторождений. В работе [5] утверждается, что за счет разработки запасов вязких нефтей Россия могла бы ежегодно получать до 25–30 млн т нефти дополнительно.

Естественно, что техника добычи высовязкой нефти отличается от техники добычи легкой нефти. Не вдаваясь в подробности, отметим, что основным способом добычи высовязкой нефти является предварительный разогрев пласта или ловушки (слабый канал связи в нашей интерпретации) с последующей откачкой получающегося флюида с допустимой вязкостью [9]. Естественно, что процесс разогрева должен быть контролируемым. Одним из способов контроля является наблюдение аномальных геофизических полей, появляющихся в результате взаимодействия объекта с первичным полем, генерируемым искусственным внешним источником (сильный канал связи в нашей интерпретации). В качестве таких полей можно использовать традиционно применяемые в геофизике поля, а именно, сейсмическое или электромагнитное поле. В данной статье рассматривается случай взаимодействия изучаемого объема гетерогенной среды с сейсмическим полем, создаваемым искусственным управляемым источником, расположенным во внешности изучаемого объекта.

На рис. 2 приведена упрощенная схема контроля добычи высоковязкой нефти из нефтяной ловушки. Для разогрева высоковязкой нефти в ловушке используется вспомогательная (техническая) скважина, через которую в ловушку закачивается разогревающий флюид, как правило, водяной пар. Этот пар вырабатывается устройством, которое условно отмечено на рисунке как парогенератор. Пар закачивается в ловушку, разогревает нефть и в результате разогрева образуется «пузырь» разогретого флюида с вязкостью, допускающей откачку через скважину, обозначенную условно как «продуктовая». Весь процесс контролируется посредством регистрации приемником вторичного сейсмического поля, появляющегося в результате рассеяния первичного (падающего) поля ловушкой. Источником первичного поля является генератор, в качестве которого на рис. 2 изображен вибратор, излучающий гармонический сигнал (условно). Пунктирными и штрих-пунктирными линиями условно показаны первичные сейсмические волны от источника – падающего поля, и вторичные сейсмические волны – поле, рассеянное ловушкой. Отметим, что рис. 2 является только иллюстрацией ситуации, имеющей место в практике добычи вязкой нефти, и ни в коей мере не претендует на статус технического проекта.

Отметим, что рассмотренный в этом пункте пример не является уникальным, но является наиболее представительным. Отметим также, что в качестве зондирующего поля можно использовать иные поля, например, электромагнитное поле. Причем в случае использования для зондирования электромагнитного поля удастся, по-видимому, избежать многих технических сложностей, связанных с генерацией первичного поля и интерпретацией вторичного (рассеянного) поля. Исследованию этого подхода будет посвящена следующая работа авторов.

Нетрудно видеть, что приведенный пример полностью соответствует описанной ранее процедуре расцепления каналов взаимодействия системы с внешней средой в ситуации, когда каналы взаимодействия можно подразделить на сильный и слабый (рис. 1).

Параметрическая зависимость материальных параметров объекта исследования от температуры

Параметрические модели экзогенных систем с сосредоточенными параметрами хорошо известны, например, параметрические зависимости элементов электрической цепи и их следствия описаны в работе [11], а работа [12] посвящена конкретному примеру математического моделирования температурной нестабильности индуктивного измерительного преобразователя в электроразведке.

Напомним в связи с этим, что для расчетов электрических цепей в рамках параметрической модели для электрического сопротивления в достаточно широком диапазоне температур $t \in [0, 600]$ °C применяется установленная экспериментально температурная (параметрическая) зависимость вида [11]

$$R(t) = R_0\left[1 + k_R^{(1)}t + k_R^{(2)}t^2 + k_R^{(3)}t^3\left(t - 100\right)\right], \tag{1}$$

где постоянные коэффициенты имеют следующие значения:

$$k_R^{(1)} = 3{,}9083 \times 10^{-3}\ {}^{\circ}\mathrm{C}^{-1},\quad k_R^{(2)} = -5{,}775 \times 10^{-7}\ {}^{\circ}\mathrm{C}^{-2},\quad k_R^{(3)} = -4{,}183 \times 10^{-12}\ {}^{\circ}\mathrm{C}^{-4}.$$

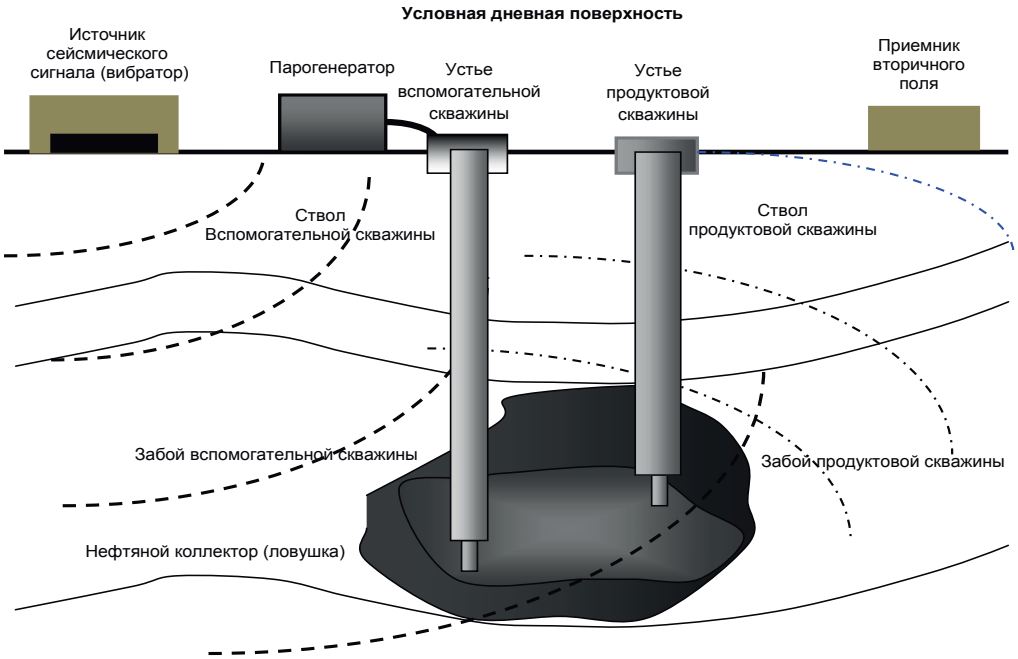


Рисунок 2. Упрощенная схема сейсмического мониторинга добычи высоковязкой нефти.
Figure 2. Simplified seismic monitoring of high-viscosity oil production.

Известно, что в температурном диапазоне $t \in [0, 300]^{\circ}C$ указанную зависимость можно заменить упрощенной формулой с квадратичной зависимостью

$$R(t) = R_0\left[1 + k_R^{(1)}t + k_R^{(2)}t^2\right], \tag{2}$$

а в более «реалистичном» диапазоне температур $t \in [-20, 60]^{\circ}C$ с высокой точностью справедлива линейная зависимость

$$R(t) = R_0\left[1 + k_R\left(t - t_0\right)\right], \tag{3}$$

Нетрудно видеть, что как функция, задаваемая формулой (1), так и более простые функции (2) и (3) на множествах своего определения [0, 600], [0, 300] и [–20, 60] соответственно являются многочленами и могут трактоваться как многочлены Тейлора для функции $R = R(t)$ соответственно третьего, второго и первого порядков.

Действительно, физически оправданные допущения относительно поведения функции $R = R(t)$ в малой окрестности отмеченной точки $t_0 \in [0, b]^{\circ}C$, принадлежащей допустимому с физической точки зрения промежутку $(0, b)^{\circ}C$ изменения параметра (температуры), приводят нас к выводу о том, что эта функция является дифференцируемой функцией класса N [13], где N – натуральный порядок, значение которого выбирается исходя из условий физической допустимости. Так как дальше, основываясь на экспериментальных данных, будем предполагать, что физически достаточны для решения поставленных задач невысокие значения N, то целесообразно расширить класс исследуемых функций до N^{∞} считая все функции дифференцируемыми «бесконечно», иными словами, столько раз, сколько требуется для решения данной задачи.

Основываясь на приведенных соображениях, будем придерживаться полевой концепции, согласно которой все математические выводы далее будут проводиться в рамках классической теории поля, одним из следствий которой является возможность представления функциональных зависимостей, входящих в математическую модель системы, формулой Тейлора или даже суммой ряда Тейлора. Такие функции в механике сплошной среды называются полевыми функциями [1].

Рассмотрим теперь параметрическую (параметр – температура) зависимость материальных параметров сплошной, в общем случае анизотропной упругой среды, которая является системой с распределенными параметрами. Более простой случай изотропной неоднородной упругой среды, когда среда характеризуется параметрами Ламе λ, μ и массовой плотностью, являющимися скалярными функциями температуры, может быть рассмотрен как частный случай изучаемой модели.

Как известно [1], идеальная сплошная упругая среда характеризуется упругими модулями, или модулями упругих податливостей, и массовой плотностью. В общем случае полностью анизотропной среды в модели линейной упругости (в данной статье рассматривается только модель физически линейной упругости) имеет место обобщенный закон Гука (далее просто закон Гука), являющийся линейным приближением в разложении функциональной зависимости

$$T_{ij} = T_{ij}(S_{kl}), \tag{4}$$

связывающей компоненты тензора напряжений T_{ij} и тензора деформаций S_{kl} в ряд Тейлора […]. Это разложение имеет вид

$$T_{ij}\left(S_{kl}\right) = \left(T_{ij}\right)_{S_{kl}=0} + \frac{1}{1!}\left(\frac{\partial T_{ij}}{\partial S_{kl}}\right)_{S_{kl}=0} S_{kl} + \frac{1}{2!}\left(\frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial S_{mn}\partial S_{kl}}\right)_{S_{kl}=0,\, S_{mn}=0} S_{kl}S_{mn} + \ldots. \tag{5}$$

Отметим, что в (5) использовано соглашение о суммировании: по дважды повторяющемуся индексу предполагается суммирование от 1 до 3. Это соглашение было введено Эйнштейном для индексов, повторяющихся один раз внизу и

один раз вверху. Мы далее используем его и для случая индексов, находящихся в одном положении. Кроме этого, для обозначения свертки тензоров будет использовано точка между компонентами соответствующих тензоров.

По определению сплошной упругой среды [1, 6] первоначальная конфигурация среды восстанавливается, когда перестают действовать внешние силы, поэтому

$$(T_{ij})_{Skl=0} = 0, \tag{6}$$

Вводя обозначения для модулей упругости первого, второго и так далее порядков

$$c_{ijkl} = \left(\frac{\partial T_{ij}}{\partial S_{kl}}\right)_{S_{kl}=0}, \; c_{ijklmn} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial S_{mn}\partial S_{kl}}\right)_{S_{kl}=0,\, S_{mn}=0}, \ldots,$$

и учитывая (6), перепишем (5) в виде

$$T_{ij}(S_{kl}) = c_{ijkl}\, S_{kl} + c_{ijklmn}\, S_{kl}.\, S_{mn}. + \ldots. \tag{7}$$

Разложение (7) является основой так называемой геометрически нелинейной теории упругости [14], которая в данной статье рассматриваться не будет.

Учитывая, что в линейной теории упругости деформации выражаются через компоненты вектора смещения формулой

$$S_{kl} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u^k}{\partial x^l} + \frac{\partial u^l}{\partial x^k}\right),$$

перепишем разложение (7), ограничиваясь линейными членами по деформациям, в следующем виде:

$$T_{ij}\left(S_{kl}\right) = c_{ijkl}\frac{1}{2}\left(\frac{\partial u^k}{\partial x^l} + \frac{\partial u^l}{\partial x^k}\right) + c_{ijklmn}\frac{1}{2}\left(\frac{\partial u^k}{\partial x^l} + \frac{\partial u^l}{\partial x^k}\right)\frac{1}{2}\left(\frac{\partial u^m}{\partial x^n} + \frac{\partial u^n}{\partial x^m}\right) + \ldots = \frac{1}{2}c_{ijkl}\frac{\partial u^k}{\partial x^l} + \frac{1}{2}c_{ijkl}\frac{\partial u^l}{\partial x^k} +$$

$$+ \frac{1}{4}c_{ijklmn}\frac{\partial u^k}{\partial x^l}\cdot\frac{\partial u^m}{\partial x^n} + \frac{1}{4}c_{ijklmn}\frac{\partial u^k}{\partial x^l}\cdot\frac{\partial u^n}{\partial x^m} + \frac{1}{4}c_{ijklmn}\frac{\partial u^l}{\partial x^k}\cdot\frac{\partial u^m}{\partial x^n} + \frac{1}{4}c_{ijklmn}\frac{\partial u^l}{\partial x^k}\cdot\frac{\partial u^n}{\partial x^m} + \ldots \approx \frac{1}{2}c_{ijkl}\frac{\partial u^k}{\partial x^l} + \frac{1}{2}c_{ijkl}\frac{\partial u^l}{\partial x^k}.$$

Используя соотношения симметрии для модулей упругости [15]

$$c_{ijkl} = c_{jikl},\; c_{ijkl} = c_{ijlk},$$

запишем для тензора напряжений следующее выражение

$$T_{ij} = \frac{1}{2}c_{ijkl}\frac{\partial u^k}{\partial x^l} + \frac{1}{2}c_{ijkl}\frac{\partial u^l}{\partial x^k} = \frac{1}{2}c_{ijlk}\frac{\partial u^l}{\partial x^k} + \frac{1}{2}c_{ijkl}\frac{\partial u^l}{\partial x^k} = \frac{1}{2}c_{ijkl}\frac{\partial u^l}{\partial x^k} + \frac{1}{2}c_{ijkl}\frac{\partial u^l}{\partial x^k} = c_{ijkl}\frac{\partial u^l}{\partial x^k}.$$

Таким образом, обобщенный закон Гука переписывается в известном виде [16]

$$T_{ij} = c_{ijkl}\frac{\partial u^l}{\partial x^k}. \tag{8}$$

Приведенные выше хорошо известные и многократно описанные в литературе тривиальные выкладки призваны помочь в понимании дальнейших преобразований и не несут, по крайней мере, пока новой информации.

В рамках идеологии многоканальности процесса закон Гука (8) по отношению к рассматриваемой экзогенной системе является материальным уравнением, описывающим одноканальный процесс в том смысле, что вспомогательный (слабый) канал взаимодействия системы и внешнего мира закрыт, то есть внешний тепловой поток в неоднородность вещественного состава, описывающую исследуемый объект, отсутствует (неоднородность не разогревается). При наличии слабого канала взаимодействия функциональная зависимость (8) должна быть обобщена и в простейшем случае может быть записана в виде

$$T_{ij}\left(\theta\right) = c_{ijkl}\left(\theta\right)\frac{\partial u^l}{\partial x^k}, \tag{9}$$

где θ – абсолютная температура, которая в зависимости от используемой системы может быть выражена в соответствующих единицах.

Ранее мы приняли в качестве постулата, что все теоретические построения будут производиться в рамках классической теории поля, следствием которой является возможность представления функций, описывающих математическую модель изучаемой системы, рядом (формулой) Тейлора. Следуя принятой концепции, считаем, что компоненты тензора модулей упругости c_{ijkl} являются полевыми функциями и могут быть представлены в виде суммы ряда Тейлора:

$$c_{ijkl}\left(\theta\right) = c_{ijkl}\left(\theta_0\right) + \frac{1}{1!}\frac{\partial c_{ijkl}}{\partial\theta}\left(\theta_0\right)\left(\theta-\theta_0\right) + \frac{1}{2!}\frac{\partial^2 c_{ijkl}}{\partial\theta^2}\left(\theta_0\right)\left(\theta-\theta_0\right)^2 + \ldots. \tag{10}$$

Постулируя существование референсного значения температуры θ_0 при нормальных условиях и полагая, что $\theta_0 \equiv 0$, заменим ряд Тейлора (10) рядом Маклорена:

$$c_{ijkl}\left(\theta\right) = c_{ijkl}\left(0\right) + \left(\frac{1}{1!}\right)\frac{\partial c_{ijkl}}{\partial\theta}\theta + \frac{1}{2!}\frac{\partial^2 c_{ijkl}}{\partial\theta^2}\left(0\right)\theta^2 + \ldots. \tag{11}$$

В формулах (10) и (11) величины $\frac{\partial c_{ijkl}}{\partial\grave{e}}$ – это производные компонент тензора модулей упругости по температуре.

Разложение (11) можно переписать в виде:

$$c_{ijkl}\left(\theta\right) = c_{ijkl}\left(0\right)\left[1+\frac{1}{c_{ijkl}\left(0\right)}\cdot\frac{\partial c_{ijkl}}{\partial\theta}\left(0\right)\theta+\frac{1}{2!c_{ijkl}\left(0\right)}\cdot\frac{\partial^2 c_{ijkl}}{\partial\theta^2}\left(0\right)+\frac{1}{2!c_{ijkl}\left(0\right)}\cdot\frac{\partial^2 c_{ijkl}}{\partial\theta^2}\left(0\right)\theta^2+\ldots\right]. \quad (12)$$

Вводя обозначения

$$\beta_c^p \overset{\text{def}}{=} \frac{1}{k!c_{ijkl}\left(0\right)}\cdot\frac{\partial^p c_{ijkl}}{\partial\theta^p}\left(0\right), \quad (13)$$

перепишем разложение (12) в следующем виде:

$$c_{ijkl}\left(x_1, x_2, x_3, \theta\right) = c_{ijkl}\left(x_1, x_2, x_3, 0\right)\left[1+\beta_c^{(1)}\theta+\beta_c^{(2)}\theta^2+\ldots\right]. \quad (14)$$

Вполне очевидно, что разложение (14) обобщает экспериментально установленные температурные зависимости вида (1) для элементов системы с сосредоточенными параметрами (электрической цепи) на упругую сплошную среду – систему с распределенными параметрами (параметры системы зависят от пространственных координат).

Теперь мы при помощи разложения (14) можем записать обобщенный закон Гука в форме, которая является основой дальнейших теоретических выводов. Для этого подставим в линейную связь напряжений с деформациями (9) разложение (14), в результате получим

$$T_{ij}\left(\theta\right) = c_{ijkl}\left(0\right)\left[1+\beta_c^{(1)}\theta+\beta_c^{(2)}\theta^2+\ldots\right]\frac{\partial u^l}{\partial x^k} \equiv \left[c_{ijkl}\left(0\right)+c_{ijkl}\left(0\right)\beta_c^{(1)}\theta+c_{ijkl}\left(0\right)\beta_c^{(2)}\theta^2+\ldots\right]\frac{\partial u^l}{\partial x^k}. \quad (15)$$

Закон Гука в виде (15) будет использован далее для получения основного уравнения рассеяния упругих (сейсмических) волн на объекте, подвергнутом тепловому воздействию, в рамках концепции двухканального подхода в приближении «расцепления» каналов взаимодействия.

Носитель математической модели объекта исследования

Основываясь на выводах предыдущих двух пунктов относительно физической модели гетерогенной среды, далее будем считать, что модули упругости и массовая плотность изучаемой среды являются функциями пространственных координат, т. е. зависят от распределения вещества в неоднородной среде, обусловленного наличием рассеивающих объектов (без учета теплового потока извне), а также функциями предварительных напряжений в среде, обусловленных тепловым воздействием на рассеивающие объекты. В данной статье рассматриваем только задачу рассеяния на уединенном объекте (рис. 3).

На рис. 3 введены следующие обозначения: V_0 – неоднородность, обусловленная отличающимся от фоновой среды вещественным составом среды – собственно рассеивающий объект; V_1 – неоднородность, обусловленная наличием поля индуцированных тепловым воздействием напряжений в изучаемом объекте. Внешняя пунктирная линия – это условная граница эффективного объема неоднородности $V_{эфф}$, за пределами которого находится фоновая среда с постоянными материальными параметрами

$$\rho = \rho_0\,;\; c_{ijkl} = c_{ijkl}^{(0)}.$$

Таким образом, предполагается, что в фоновой среде нет индуцированных напряжений, а ее вещественный состав предполагается постоянным.

В идеале эффективный объем неоднородности может быть представлен следующим образом:

$$V_{эфф} \overset{\text{def}}{=} V_0 \cup V_1,$$

Однако для численного моделирования удобно полагать (рис. 3), что полный объем неоднородности

$$V_0 \cup V_1 \subset\subset V_{эфф}, \quad (16)$$

т. е. целиком заключен в $V_{эфф}$. Понятие эффективного объема неоднородности, введенное впервые в работах [5], позволит в дальнейшем при проведении выкладок отказаться от операции дифференцирования обобщенных функций, что значительно упростит все выводы.

В линейной теории рассеяние упругих волн неоднородностями гетерогенной среды описывается теорией возмущений для уравнения

$$\rho\frac{\partial^2 u^i}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial x^j}\left[c_{ijkl}\frac{\partial u^l}{\partial x^k}\right] + \rho f^i. \quad (17)$$

Предполагается, что в одноканальной теории рассеяния модули упругости зависят от координат точек сплошной среды, т. е.

$$c_{ijkl} = c_{ijkl}\left(x_1, x_2, x_3\right) \equiv c_{ijkl}\left(\vec{x}\right),$$

и могут быть представлены в виде

$$c_{ijkl}\left(x_1, x_2, x_3, 0\right) \equiv \overset{0}{c}_{ijkl} + \Delta c_{ijkl}\left(x_1, x_2, x_3, 0\right), \quad (18)$$

Величины Δc_{ijkl}, зависящие только от пространственных координат, называются вариациями, или флуктуациями модулей упругости, и позволяют смоделировать наличие в среде неоднородностей вещественного состава [2].

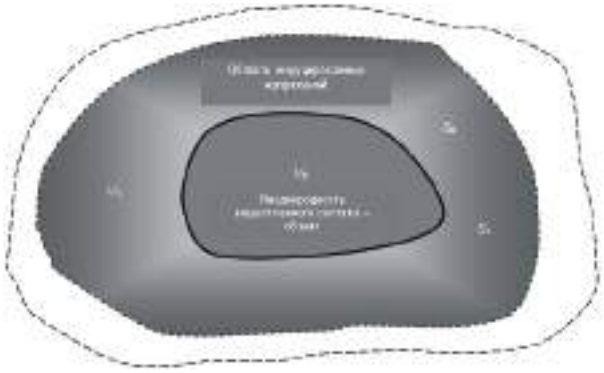


Рисунок 3. Определение эффективного объема рассейвающей неоднородности.
Figure 3. Determination of the effective volume of dispersing heterogeneity.

Если учесть зависимость модулей упругости от индуцированных напряжений в среде, обусловленных их температурной зависимостью, то их следует рассматривать как функции четырех независимых переменных

$$c_{ijkl} = c_{ijkl}\left(x_1, x_2, x_3, \theta\right), \tag{19}$$

Тогда в линейном приближении вместо (18) материальные параметры среды можно представить в виде

$$c_{ijkl}\left(x_1, x_2, x_3, \theta\right) \equiv \overset{0}{c}_{ijkl} + \Delta c_{ijkl}\left(x_1, x_2, x_3, 0\right) + \Delta c_{ijkl}\left(x_1, x_2, x_3, \theta\right), \tag{20}$$

В формулах (20) первое слагаемое – модули упругости однородной фоновой среды, второе слагаемое – вариации модулей упругости, обусловленные неоднородностью вещественного состава:

$$\Delta c_{ijkl}\left(x_1, x_2, x_3, 0\right) = c_{ijkl}\left(x_1, x_2, x_3, 0\right) - \overset{0}{c}_{ijkl}, \tag{21}$$

т. е. наличием в среде рассеивающих объектов (формула (18)), а третье слагаемое – это вариации модулей упругости, обусловленные наличием тепловых процессов, вызывающих появление индуцированных (предварительных) напряжений в рассеивающем объекте

$$\Delta c_{ijkl}\left(x_1, x_2, x_3, \theta\right) = c_{ijkl}\left(x_1, x_2, x_3, \theta\right) - \overset{0}{c}_{ijkl}.$$

С учетом (14) для $\Delta c_{ijkl}(x_1, x_2, x_3, \theta)$ получаем:

$$\Delta c_{ijkl}\left(x_1, x_2, x_3, \theta\right) = c_{ijkl}\left(x_1, x_2, x_3, \theta\right) - \overset{0}{c}_{ijkl} = c_{ijkl}\left(x_1, x_2, x_3, 0\right)\left[1+\beta_c^{(1)}\theta+\beta_c^{(2)}\theta^2+\ldots\right] - \overset{0}{c}_{ijkl}. \tag{22}$$

В формулах (22) величины $c_{ijkl}(x_1, x_2, x_3, 0)$ определяются из зависимостей модулей упругости (19) при «нормальных условиях $\theta = 0$» для неоднородного рассеивающего объекта, т. е. определяются формулой (18):

$$c_{ijkl}\left(x_1, x_2, x_3, 0\right) = c_{ijkl}\left(x_1, x_2, x_3, \theta\right)\Big|_{\theta=0} = -\overset{0}{c}_{ijkl} + \Delta c_{ijkl}\left(x_1, x_2, x_3, 0\right), \tag{23}$$

причем для $c_{ijkl}(x_1, x_2, x_3)$ в общем случае может выполняться одно из трех соотношений:

$$c_{ijkl}\left(x_1, x_2, x_3, 0\right) < c^0_{ijkl}\left(x_1, x_2, x_3\right),$$

$$c_{ijkl}\left(x_1, x_2, x_3, 0\right) > c^0_{ijkl}\left(x_1, x_2, x_3\right),$$

$$c_{ijkl}\left(x_1, x_2, x_3, 0\right) = c^0_{ijkl}\left(x_1, x_2, x_3\right),$$

Проводя несложные выкладки путем комбинирования полученных соотношений (20), (21), (22) и (23), получаем:

$$c_{ijkl}\left(x_1, x_2, x_3, \theta\right) \equiv \overset{0}{c}_{ijkl} + \Delta c_{ijkl}\left(x_1, x_2, x_3, 0\right) + \Delta c_{ijkl}\left(x_1, x_2, x_3, \theta\right) = \left\{(20),(22)\right\} = \overset{0}{c}_{ijkl} + c_{ijkl}\left(x_1, x_2, x_3, 0\right) -$$

$$-\overset{0}{c}_{ijkl} + c_{ijkl}\left(x_1, x_2, x_3, 0\right)\left[1+\beta_c^{(1)}\theta+\beta_c^{(2)}\theta^2+\ldots\right] - \overset{0}{c}_{ijkl} = c_{ijkl}\left(x_1, x_2, x_3, 0\right)\left[2+\beta_c^{(1)}\theta+\beta_c^{(2)}\theta^2+\ldots\right] - \overset{0}{c}_{ijkl} =$$

$$= \left[c^0_{ijkl}+\Delta c_{ijkl}\left(x_1, x_2, x_3, 0\right)\right]\left[2+\beta_c^{(1)}\theta+\beta_c^{(2)}\theta^2+\ldots\right] - \overset{0}{c}_{ijkl} = 2\overset{0}{c}_{ijkl} + \overset{0}{c}_{ijkl}\left[1+\beta_c^{(1)}\theta+\beta_c^{(2)}\theta^2+\ldots\right] + 2\Delta c_{ijkl}\left(x_1, x_2, x_3, 0\right) +$$

$$+\Delta c_{ijkl}\left(x_1, x_2, x_3, 0\right)\left[1+\beta_c^{(1)}\theta+\beta_c^{(2)}\theta^2+\ldots\right] - \overset{0}{c}_{ijkl} = \overset{0}{c}_{ijkl} + \overset{0}{c}_{ijkl}\left[1+\beta_c^{(1)}\theta+\beta_c^{(2)}\theta^2+\ldots\right] + \Delta c_{ijkl}\left(x_1, x_2, x_3, 0\right) \times$$

$$\times\left[3+\beta_c^{(1)}\theta+\beta_c^{(2)}\theta^2+\ldots\right] = \overset{0}{c}_{ijkl}\left[2+\beta_c^{(1)}\theta+\beta_c^{(2)}\theta^2+\ldots\right] + \Delta c_{ijkl}\left(x_1, x_2, x_3, 0\right)\left[3+\beta_c^{(1)}\theta+\beta_c^{(2)}\theta^2+\ldots\right].$$

Носитель математической модели объекта исследования представим следующими математическими соотношениями:

$$c_{ijkl}\left(x_1, x_2, x_3, \theta\right) = \overset{0}{c}_{ijkl}\left[2+\beta_c^{(1)}\theta+\beta_c^{(2)}\theta^2+\ldots\right] + \Delta c_{ijkl}\left(x_1, x_2, x_3, 0\right)\left[3+\beta_c^{(1)}\theta+\beta_c^{(2)}\theta^2+\ldots\right]. \quad (24)$$

К соотношениям (24) следует добавить аналогичное соотношение для массовой плотности:

$$\rho\left(x_1, x_2, x_3, \theta\right) = \rho_0\left[2+\alpha_c^{(1)}\theta+\alpha_c^{(2)}\theta^2+\ldots\right] + \Delta\rho\left(x_1, x_2, x_3, 0\right)\left[3+\alpha_c^{(1)}\theta+\alpha_c^{(2)}\theta^2+\ldots\right]. \quad (25)$$

Из (24) и (25) видно, что с учетом температурных зависимостей флуктуации материальных параметров приобретают следующий вид:

$$\Delta c_{ijkl}\left(\vec{x}, \theta\right) = c_{ijkl}\left(\vec{x}, \theta\right) - \overset{0}{c}_{ijkl} = \overset{0}{c}_{ijkl}\left[1+\beta_c^{(1)}\theta+\beta_c^{(2)}\theta^2+\ldots\right] + \Delta c_{ijkl}\left(x_1, x_2, x_3, 0\right)\left[3+\beta_c^{(1)}\theta+\beta_c^{(2)}\theta^2+\ldots\right]; \quad (26)$$

$$\Delta\rho\left(\vec{x}, \theta\right) = \rho\left(\vec{x}, \theta\right) - \rho_0 = \rho_0\left[1+\alpha_c^{(1)}\theta+\alpha_c^{(2)}\theta^2+\ldots\right] + \Delta\rho\left(\vec{x}, 0\right)\left[3+\alpha_c^{(1)}\theta+\alpha_c^{(2)}\theta^2+\ldots\right], \quad (27)$$

где для краткости записи использовано обозначение $\vec{x} \Leftrightarrow x_1, x_2, x_3$.

Соотношения (24)–(27) задают математическую модель объекта, которая используется в данной статье для построения теории уединенного акта рассеяния упругой (сейсмической) волны в нулевом приближении двухканального метода.

Математическая модель процесса рассеяния упругих волн объектом с индуцированными тепловыми напряжениями

Рассмотрим теперь построение математической модели рассеяния упругих волн ограниченным объектом, основанные на предыдущих выводах. При этом будем использовать результаты работ [2–5].

Уравнения распространения упругих волн для неоднородной среды в компонентной форме имеют вид ($i, j, k, l = 1, 2, 3$) [1]:

$$\rho\frac{\partial^2 u^i}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial x^2}\left[c_{ijkl}\frac{\partial u^l}{\partial x^k}\right] + \rho f^i. \quad (28)$$

Ограничим, как это принято, модель процесса рассеяния, предполагая для всех полевых функций и внешних сил временную зависимость вида $\exp(-i\omega t)$. Такое ограничение упрощает математический аппарат и соответствует возможностям эксперимента. Тогда уравнение (28) примет вид

$$\frac{\partial}{\partial x^j}\left[c_{ijkl}\frac{\partial u^l}{\partial x^k}\right] + \rho\omega^2 u^i = -\rho f^i. \quad (29)$$

Учитывая в (29) общее представление флуктуаций материальных параметров среды вида (18), после простых преобразований можно получить

$$\overset{0}{c}_{ijkl}\frac{\partial^2 u^l}{\partial x^j \partial x^k} + \overset{0}{\rho}\overset{0}{\omega}{}^2 u^i + \frac{\partial}{\partial x^j}\left[\Delta c_{ijkl}\left(\vec{x}\right)\frac{\partial u^l}{\partial x^k}\right] + \Delta\rho\omega^2 u^i = -\overset{0}{\rho} f^i - \Delta\rho\left(\vec{x}\right) f^i$$

или

$$\overset{0}{c}_{ijkl}\frac{\partial^2 u^l}{\partial x^j \partial x^k} + \overset{0}{\rho}\overset{0}{\omega}{}^2 u^i = -\frac{\partial}{\partial x^j}\left[\Delta c_{ijkl}\left(\vec{x}\right)\frac{\partial u^l}{\partial x^k}\right] - \Delta\rho\left(\vec{x}\right)\omega^2 u^i - \overset{0}{\rho} f^i. \quad (30)$$

Система уравнений (30) является моделью процесса рассеяния упругих волн неоднородным включением V_1, помещенным в однородную среду V_2. Можно сказать также, что уравнения (30) являются моделью процесса рассеяния упругих волн в неоднородной среде $V = V_1 \cup V_2$.

Функция Грина дифференциального оператора в левой части (30) является решением уравнения

$$\overset{0}{c}_{ijkl}\frac{\partial^2}{\partial x^j \partial x^k} G_{jk} + \overset{0}{\rho}\overset{0}{\omega}{}^2 G_{ij} = -\delta_{ij}\,\delta\left(\vec{x}-\vec{x}_1\right). \quad (31)$$

Получение решения уравнения (2.9.7) – функции Грина для упругих волн – весьма громоздко, а его подробный вывод приведен в работе [16]. Запишем лишь конечный результат – функцию Грина для неограниченной изотропной среды:

$$G_{mn}\left(\vec{x}, \vec{x}', \omega\right) = \frac{1}{4\pi\rho\omega^2}\left[\delta_{mn}k_s^2\frac{\exp(ik_s r)}{r}\right] - \left(\frac{\partial^2}{\partial x_m \partial x_n}\right)\left(\frac{\exp(ik_p r)}{r} - \frac{\exp(ik_s r)}{r}\right). \quad (32)$$

Здесь k_p, k_s – волновые числа для продольных и поперечных волн, соответственно.

Записывая формальное решение уравнения (30) как свертку функции Грина и источников в правой части (30), получаем

$$u^i\left(\vec{x}\right) = \iiint_{V1}\left\{\frac{\partial}{\partial x_j^1}\left[\Delta c_{pjkl}\left(\vec{x}_1\right)\frac{\partial u_l}{\partial x_k^1}\right] + \Delta\rho\left(\vec{x}_1\right)\omega^2 u^p\left(\vec{x}_1\right)\right\} G_{ip}\left(\vec{x}, \vec{x}_1, \omega\right) d\vec{x}_1 + \overset{0}{\rho}\iiint_{V'} f^p\left(\vec{x}_1\right) G_{ip}\left(\vec{x}, \vec{x}', \omega\right) d\vec{x}'. \quad (33)$$

Напомним, что второе слагаемое в правой части (33) интерпретируется как решение уравнения

$$\overset{0}{c}_{ijkl}\frac{\partial^2 u_l}{\partial x_j \partial x_k} + \overset{0}{\rho}\overset{0}{\omega}{}^2 u_i = -\overset{0}{\rho} f_i$$

и описывает распространение возмущения от источников поля, сосредоточенных в объеме V, в однородной среде в отсутствие включения и называется в теории рассеяния падающим или первичным полем:

$$u_i^{in}\left(\vec{x}\right) \overset{\text{def}}{=} \rho^0 \iiint\limits_{V'} f_p\left(\vec{x}'\right) G_{ip}\left(\vec{x},\vec{x}',\omega\right) dx'.$$

Первое слагаемое в (33) обусловлено наличием вторичных источников – флуктуаций модулей упругости $\Delta c_{ijkl}\left(\vec{x}\right)$ и плотности $\Delta\rho\left(\vec{x}\right)$ в объеме неоднородности V_1 – и называется рассеянным полем

$$u_i^{scat}\left(\vec{x}\right) \overset{\text{def}}{=} \iiint\limits_{V1} \left\{ \frac{\partial}{\partial x_j^1}\left[\Delta c_{pjkl}\left(\vec{x}_1\right)\frac{\partial u_l}{\partial x_k^1}\right] + \Delta\rho\left(\vec{x}_1\right)\omega^2 u^p\left(\vec{x}_1\right)\right\} G_{ip}\left(\vec{x},\vec{x}_1,\omega\right) d\vec{x}_1 .$$

Таким образом, в предположении линейности процесса рассеяния полное волновое поле $u_i\left(\vec{x}\right)$ (i = 1, 2, 3) в объеме среды $V = V_1 \cup V_2$ представляется в виде суммы

$$u_i\left(\vec{x}\right) = u_i^{in}\left(\vec{x}\right) + u_i^{scat}\left(\vec{x}\right). \tag{34}$$

Отметим, что рассеянное поле должно удовлетворять условию излучения Зоммерфельда, состоящему в том, что на бесконечно удаленной поверхности

$$\lim_{\left\|\vec{x}\right\|\to\infty} \frac{1}{\left\|\vec{x}\right\|} u_i^{scat}\left(\vec{x}\right) = 0$$

Наличие в уравнении (33) члена с производными от функций, которые в общем случае могут иметь разрывы первого рода, а именно членов вида

$$\frac{\partial}{\partial x_j^1}\left[\Delta c_{pjkl}\left(\vec{x}_l\right)\frac{\partial u_l}{\partial x_k^l}\right] (p, j, k, l = 1,2,3)$$

приводит к серьезным вычислительным трудностям в случае неоднородностей среды с резкими границами. Эти трудности удается преодолеть, если применить процедуру предельного перехода, предложенную в работе Pao и Varatharajuly [3–5, 11]. Применение этой процедуры приводит к интегральному уравнению следующего вида:

$$u_i\left(\vec{x},\omega\right) = u_i^{in}\left(\vec{x},\omega\right) \iiint\limits_{V1} \left\{ \Delta\rho\left(\vec{x}_1\right)\omega^2 u_p\left(\vec{x}_1,\omega\right) G_{ip}\left(\vec{x},\vec{x}_1,\omega\right) - \Delta c_{pjkl}\left(\vec{x}_1\right)\frac{\partial u_l}{\partial x_k^1}\left(\vec{x},\omega\right)\frac{\partial}{\partial x_j^1} G_{ip}\left(\vec{x},\vec{x}_1,\omega\right) + \left(\vec{x}_1\right)\right\} d\vec{x}_1 . \tag{35}$$

Уравнение (35) позволяет вычислять поле, рассеянное объектом, в одноканальной (в рамках принятой терминологии) теории рассеяния.

Пусть теперь рассматривается математическая модель двухканального процесса с каналами, связь между которыми разорвана. Тогда, учитывая в уравнении (35) наличие кроме флуктуаций, обусловленных неоднородностью вещественного состава, также флуктуаций, обусловленных внешними воздействиями немеханической (тепловой) природы, можем переписать уравнение (35) с учетом формул (26) и (27) в следующем виде:

$$\begin{aligned} u^i\left(\vec{x},\omega\right) = u_{in}^i\left(\vec{x},\omega\right) + \iiint\limits_{V\text{эфф}} \Big\{ &\left[\rho_0\left(\vec{x}\right)\left(1+\alpha_c^{(1)}\theta+\alpha_c^{(2)}\theta^2+\ldots\right)+\Delta\rho\left(\vec{x}_1,0\right)\left(3+\alpha_c^{(1)}\theta+\alpha_c^{(2)}\theta^2+\ldots\right)\right]\omega^2 u_p\left(\vec{x}_1,\omega\right) G_{ip}\left(\vec{x},\vec{x}_1,0\right) - \\ &-\left[c_{pjkl}\left(1+\beta_c^{(1)}\theta+\beta_c^{(2)}\theta^2+\ldots\right)\Delta c_{pjkl}\left(\vec{x}_1,0\right)\left(3+\beta_c^{(1)}\theta+\beta_c^{(2)}\theta^2+\ldots\right)\right]\frac{\partial u_l}{\partial x_k^1}\left(\vec{x},\omega\right)\frac{\partial G_{ip}}{\partial x_j^1}\left(\vec{x},\vec{x}_1,\omega\right)\Big\} d\vec{x}_1 . \end{aligned} \tag{36}$$

Напомним, что по повторяющемуся дважды индексу в уравнении (36), как и во всех предшествующих формулах и соотношениях, производится суммирование в пределах $1 \le i, j, k, l \le 3$.

Уравнение (36) достаточно громоздкое. Его можно несколько упростить, ограничиваясь конечным числом членов в разложении функциональных зависимостях материальных параметров в ряд Тейлора по температуре. Например, в линейном приближении уравнение примет, очевидно, следующий вид:

$$\begin{aligned} u^i\left(\vec{x},\omega\right) = u_{in}^i\left(\vec{x},\omega\right) + \iiint\limits_{V\text{эфф}} \Big\{ &\left[\rho_0\left(\vec{x}\right)\left(1+\alpha_c^{(1)}\theta\right)+\Delta\rho\left(\vec{x}_1,0\right)\left(3+\alpha_c^{(1)}\theta\right)\right]\omega^2 u_p\left(\vec{x}_1,\omega\right) G_{ip}\left(\vec{x},\vec{x}_1,0\right) - \\ &-\left[c_{pjkl}^0\left(1+\beta_c^{(1)}\theta\right)+\Delta c_{pjkl}\left(\vec{x}_1,0\right)\left(3+\beta_c^{(1)}\theta\right)\right]\frac{\partial u_l}{\partial x_k^1}\left(\vec{x},\omega\right)\frac{\partial G_{ip}}{\partial x_j^1}\left(\vec{x},\vec{x}_1,\omega\right)\Big\} d\vec{x}_1 . \end{aligned} \tag{37}$$

Уравнение (36) – это искомое уравнение, описывающее рассеяние упругих волн уединенным объектом, находящимся под внешним тепловым воздействием, в рамках концепции параметрических систем. Уравнение (36) по существу является системой трех интегральных уравнений типа Фредгольма. Решение конкретной задачи с помощью этого уравнения можно находить одним из известных численных методов [13].

Выводы и заключение

В статье разработана теория рассеяния упругих волн объектом с предварительными напряжениями, индуцированными в материале рассеивателя посредством теплового канала связи с внешним миром. Предложен способ расцепления

механического и теплового каналов внешних воздействий, основанный на физически обоснованном предположении о слабости теплового канала, индуцирующего предварительные напряжения в материале рассеивающего объекта.

Модельной задачей для разработанной теории послужила задача контроля добычи высоковязкой нефти из предварительно разогретой ловушки, имеющая большое значение для промысловой геофизики.

Предлагаемая в статье теория позволяет в рамках физически обоснованных предположений свести решение весьма сложной в вычислительном плане нелинейной задачи о взаимодействии изучаемого объекта с сопряженными физическими полями (скалярное тепловое поле – векторное упругое волновое поле) к решению двух независимых задач – задачи о взаимодействии объекта с тепловым полем и задачи о взаимодействии объекта с волновым полем. Такое расцепление каналов взаимодействия позволяет перевести математическую модель изучаемой системы из класса сложных нелинейных математических моделей в класс значительно более простых параметрических моделей. Тем самым значительно упрощается алгоритм расчета отклика системы на внешнее воздействие, что позволяет серьезно сократить время расчетов с целью контроля процессов, происходящих в объекте исследования. Применительно к модельной задаче можно сказать, что резкое сокращение времени расчетов приводит в перспективе к соответствующему сокращению времени контроля за разогревом нефти в ловушке, а следовательно, появляется возможность оперативного контроля за процессом добычи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Самарский А. А., Михайлов А. П. Математическое моделирование. Идеи. Методы. Примеры. М.: Физматлит, 2002. 320 с.
2. Pao Y. H., Varatharajulu V. Huygens' principle, radiation conditions, and integral formulas for the scattering of elastic waves // J. Acoust. Soc. Amer. 1976. Vol. 59, № 6. P. 1361–1371. https://doi.org/10.1121/1.381022
3. Hudson J. A. The scattering of elastic waves by granular media // Quart Journal Mech. and Applies Math. 1968. Vol. 21, № 4. P. 487–502.
4. Surnev V. B., Islamgaliev D. V. Analisi di strade di protezione di domande di cliente // Italian Science Review. 2016. Vol. 2 (35). P. 16–30.
5. Данилова Е. Тяжелые нефти России // The Chemical Journal. Химический журнал. 2008. № 12. С. 34–37.
6. Дубинский Г. С. О вовлечении в разработку залежей с трудноизвлекаемой нефтью // Наука XXI века: теория, практика, перспективы: сборник трудов междунар. науч.-практ. конф. Уфа, 2015. С. 161–164.
7. Каюкова Г. П., Романов Г. В., Абдрафикова И. М., Петров С. М. Температурно-вязкостные характеристики сверхтяжелой нефти Ашальчинского месторождения // Нефтяное хозяйство. 2013. № 9. С. 44–46.
8. Макаревич В. Н., Искрицкая Н. И., Богословский С. А. Ресурсный потенциал месторождений тяжелых нефтей европейской части Российской Федерации // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2012. Т. 7, № 3. С. 13–14. http://www.ngtp.ru/rub/6/43_2012.pdf
9. Рощин П. В., Петухов А. В., Васкес Карденас Л. К., Назаров А. Д., Хромых Л. Н. Исследование реологических свойств высоковязких и высокопарафинистых нефтей месторождений Самарской области // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2013. Т. 8, № 1. С. 12–13. https://doi.org/10.17353/2070-5379/12_2013
10. Селимов А. Д. Тепловые методы добычи высоковязких нефтей // Молодежный научный форум. Технические и математические науки: материалы XLIII студенческой междунар. заочной науч.-практ. конф. 2017. № 3. С. 54–58.
11. Васильев Д. В., Витоль М. Р., Горшенков Ю. Н. и др. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Радио и связь, 1982. 528 с.
12. Сурнев В. Б., Пяткова В. Б., Человечков А. И. Параметрическая модель индуктивного измерительного преобразователя // Изв. вузов. Горный журнал. 2010. № 1. С. 49–56.
13. Владимиров В. С. Уравнения математической физики. М.: Наука, 1988. 512 с.
14. Лурье А. И. Нелинейная теория упругости. М.: Наука, 1980. 512 с.
15. Дьелесан Э., Руайе Д. Упругие волны в твердых телах. М.: Наука, 1982. 424 с.
16. Жданов М. С., Матусевич В. Ю. Сейсмическая и электромагнитная миграция. М.: Наука, 1988. 376 с.
17. Калиткин Н. Н. Численные методы. М.: Наука, 1978. 512 с.

Статья поступила в редакцию 26 февраля 2019 г.

УДК 517.91/.93 + 517.95 + 550.34 + 550.34.01 + 550.344.6 https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-3-79-89

Information bearer channel method in the theory of exogenous geophysical systems

Victor Borisovich SURNEV[1, 2*],
Vera Borisovna PYATKOVA[1],
Dmitry Vladimirovich ISLAMGALIEV[1]

[1]Ural State Mining University, Russia, Ekaterinburg
[2]Ural Federal University, Russia, Ekaterinburg

The relevance of the work. The relevance of the proposed theory is justified, for example, by the fact that, according to experts, Russia has very significant reserves of viscous oils (about 7 billion tons), the production of which is carried out by heat heating the contents of the trap or reservoir with superheated water vapor followed by pumping-out of the resulting fluid.
Purpose of work. *Development of the theoretical foundations of seismic monitoring of the production of high-viscosity oil.*
The methodology *of the theory considered in this article is based on the postulate of the two-channel nature of the process of interaction of a limited object (system) with the outside world. Through the first channel, an action is made on an object of a vector wave field, in this work it is an elastic wave field. Through the second channel, a stationary scalar field is exposed to the object; in this work, it is a thermal field. Thus, the theory of scattering of elastic waves by an object under the influence of an external scalar (thermal) field is considered. The scalar field in the material of the object induces preliminary elastic stresses, which appear as the response of the object to this effect. The secondary thermal field existing in the exterior of the object is not considered. Thus, the general self-consistent problem of the two-channel interaction of an object with an external field undergoes a channel decoupling procedure and reduces to scattering of an elastic wave by an object with material parameters functionally dependent on external thermal action, i.e., a general nonlinear physical system with distributed object-wave field parameters "Scalar field" is considered as a parametric system, which allows us to significantly simplify the algorithm and reduce the required for numerical simulation resources. Ideally, the algorithm and program for numerically solving the scattering problem should be brought to a state that allows for numerical simulation on a personal computer.*
As a model problem for the theory, which is supposed to be brought to practical implementation in the form of an algorithm and a complex of computational programs, the problem of seismic monitoring of the state of a trap with high-viscosity oil during heating of the trap by external heat, which is important for field and exploration geophysics, has been selected. Further, the authors propose to generalize the theory, develop an algorithm and create a complex of computer programs for electromagnetic monitoring of the state of an object under the influence of an external scalar (thermal) field, as well as the theory of interaction of an object with the outside world through several channels. For a more complete monitoring of the process, its mathematical model should be generalized to a substantially multichannel level, that is, consider the mathematical model "object – elastic wave field – electromagnetic wave field – heat field – field of static loading". The theory of multichannel interaction of an object with the outside world, generalized into several fields, can also be used for mathematical modelling in other areas of physics and technology, for example, in defectoscopy.
Results. *The paper discusses the theory of process of interaction of a limited object (system) with the outside world, which is carried out through two information bearer channels. Through the first channel, a vector wave field is applied to the object (it is an elastic wave field in this work). Through the second channel, a stationary scalar field is exposed to the object (it is a thermal field in this work).*

Keywords: scattering theory; elastic waves; seismic waves; pre-tensioning; high-viscosity oil; seismic control; math modelling; Lipman-Schwinger equation; integral equations.

ЛИТЕРАТУРА

1. Samarskiy A. A., Mikhaylov A. P. 2002, *Matematicheskoye modelirovaniye. Idei. Metody. Primery* [Mathematical modeling. Ideas. Methods Examples]. Moscow, 320 p.
2. Pao Y. H., Varatharajulu V. 1976, Huygens' principle, radiation conditions, and integral formulas for the scattering of elastic waves. *J. Acoust. Soc. Amer.*, vol. 59, no. 6, pp. 1361–1371. https://doi.org/10.1121/1.381022
3. Hudson J. A. 1968, The scattering of elastic waves by granular media. *Quart Journal Mech. and Applies Math.*, vol. 21, no. 4, pp. 487–502.
4. Surnev V. B., Islamgaliev D. V. 2016, Analisi di strade di protezione di domande di cliente. Italian Science Review., vol. 2 (35), pp. 16–30.
5. Danilova E. 2008, Heavy oils of Russia. *Khimicheskiy zhurnal* [The Chemical Journal], no. 12, pp. 34–37. (*In Russ.*)
6. Dubinsky G. S. 2015, About involvement in the development of deposits with hard-to-recover oil. 21st Century Science: Theory, Practice, Prospects: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference. Ufa, pp. 161–164.
7. Kayukova G. P., Romanov G. V., Abdrafikova I. M., Petrov S. M. 2013, Temperature and viscosity characteristics of high-paraffin crude oil of the Ashalchinsky field. *Neftyanoye khozyaystvo* [Oil industry], no. 9, pp. 44–46. (*In Russ.*)
8. Makarevich V. N., Iskritskaya N. I., Bogoslovsky S. A. 2012, Resource potential of low-grade oil fields in the European part of the Russian Federation. *Neftegazovaya Geologiya. Teoriya I Praktika* [Petroleum Geology – Theoretical and Applied Studies], vol. 7, no. 3, pp. 13–14. (*In Russ.*) http://www.ngtp.ru/rub/6/43_2012.pdf
9. Roshchin P. V., Petukhov A. V., Vazquez Kardenas L. K., Nazarov A. D., Khromykh L. N. 2013, Study of the rheological properties of high-viscosity and high-paraffin oils in the Samara Region deposits. *Neftegazovaya Geologiya. Teoriya I Praktika* [Petroleum Geology – Theoretical and Applied Studies], vol. 8, no. 1, pp. 12–13. (*In Russ.*) https://doi.org/10.17353/2070-5379/12_2013
10. Selimov A. D. 2017, Thermal methods of extraction of high-viscosity oils. Forum of young reseachers. Technical and mathematical sciences: materials of the XLIII student international correspondence scientific-practical conference, no. 3, pp. 54–58.
11. Vasil'yev D. V., Vitol' M. R., Gorshenkov YU. et al. 1982, *Radiotekhnicheskiye tsepi i signaly* [Radio engineering circuits and signals]. Moscow, 528 p.
12. Surnev V. B., Pyatkova V. B., Manchekov A. I. 2010, Parametric model of inductive measuring transducer. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal* [News of the Higher Institutions. Mining Journal], no. 1, pp. 49–56. (*In Russ.*)
13. Vladimirov V. S. 1988, *Uravneniya matematicheskoy fiziki* [Equations of mathematical physics]. Moscow, 512 p.
14. Lurie A. I. 1980, *Nelineynaya teoriya uprugosti* [Nonlinear theory of elasticity]. Moscow, 512 p.
15. Dielesan E., Royer D. 1982, *Uprugiye volny v tverdykh telakh* [Elastic waves in solids]. Moscow, 424 p.
16. Zhdanov M. S., Matusevich V. Yu. 1988, *Seysmicheskaya i elektromagnitnaya migratsiya* [Seismic and electromagnetic migration]. Moscow, 376 p.
17. Kalitkin N. N. 1978, *Chislennyye metody* [Numerical methods]. Moscow, 512 p.

The article was received on February, 26, 2019

*✉ sournev@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0001-6534-6668
** vera.pytkova@m.ursmu.ru
***dif1205@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-4222-9458

Технические науки
Engineering sciences

УДК 550.83 https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-3-90-97

Study of genesis of productive series based on integrated well data (in case of Pirallahi field)

Kifayat Aladdin KERIMOVA*,
Reyhanxanim Yashar GANIYEVA**

Azerbaijan State Oil and Industry University, Baku, Azerbaijan

Relevance. It is known that over than 90 % of oil produced in Azerbaijan is extracted from the South Caspian Basin. The South Caspian basin is one of the largest deeply buried basins. Sedimentation process here is characterized by high rate as 25 km for 150–170 mln years (0.6–0.7 km/mln years). For the last years due to wider scope of exploration works in the South Caspian basin and evaluation of its hydrocarbon perspectives the study of genesis of Productive Series gain more interest.
Purpose of work. The purpose of the work is to study genesis of sediments and sedimentation environment on the basis of quantitative and qualitative interpretation of logging curves, make correlation of facies in various wells and perform comparative analysis.
Research methodology. Applying "Quantitative and qualitative models of log facies" on the basis of well logging data the analysis of lithology, facies and genesis of sedimentary rocks in Pirallahi structure have been done and results were derived. Within the framework of the study by use of Neuralog software based on LL, SP, GL, NGL and other log types the data have been transformed into the LAS format, then the permeability, porosity, oil and gas saturation, bulk clay coefficient alteration models have been designed by use of Petrel software.
Conclusions. Study of sedimentation environment constantly draws the interest of geoscientists due to the direct dependence of structure and identification of oil and gas traps on sedimentation environment. This paper deals with study of genesis of Productive Series deposits based on quantitative and qualitative analysis of logging curves. The study target is Kirmaky suite across Pirallahi field of Absheron oil-gas bearing region.

Keywords: facies analysis, log facies, genesis, flow, bar, coastal plain.

Relevance

In Azerbaijan more than 90 % of oil is produced from fields of the South Caspian basin. The South Caspian basin is one of the basins subsided to the large depths.

Sedimentation process here is characterized by high rate and reaches approximately 25 km per 150–170 million years (0.6–0.7 km/mln years). Characteristic features of the South Caspian basin involves compression of its sedimentation components and overpressure in some areas [1]. The major role in the III period sedimentation played fluvial-deltaic, avandeltaic sediments, turbidites and contourites accumulated mainly in river deltas, faults and paleogeographic plains [2–5].

In general, the morphology of negative relief (river-channels, channel, cliffs) where sediments are accumulated depends mostly on dip angle, sediments thickness, climate, tectonic features, etc. [6]. Reservoirs generated at various time periods and in changing environment vary in time depending on morphology of negative releif (river, river-bed, cliff). Thus, fluvial-deltaic system is not constant through a definite stratigraphic unit. The problem consists in generation of facies alteration and unconformity surfaces in fluvial systems [7].

Purpose of work

In this respect, the study of sedimentation environment and genesis of sedimentation process is always in the sphere of interest of petroleum geoscientists. For the last years the lithological traps are also studied along with structural and stratigraphic traps.

This study is devoted to analysis of genesis and environment of sedimentation process done through quantitative and qualitative interpretation of logging curves.

The study target is Kirmaky suite in sections of conditionally numbered wells X1, X2, X3, X4 and X5 in Pirallahi area.

Productive Series (PS) deposits of Absheron oil-gas bearing region consist mostly of alternation of sandstone, sandstone clay, aleurolites, argilltes and clay layers and have vast hydrocarbon reserves. It is known that Productive Series in Pirallahi field consists of alternation of sand, sandstone, aleurite and clay. Its maximum thickness is 1380 m. Due to erosion of upper part of PS, it is mainly represented by lower part (Gala, Post-Kirmaky, Kirmaky, Upper-Kirmaky sand, Upper-Kirmaky clay suites). Of these the oil presence is identified in Post- Kirmaky, Kirmaky and partially in Gala series (in the south Pirallahi fault) [8].

According to results of geophysical studies covering Kirmaky suite of PS in Pirallahi area the study of genesis of PS deposits drives attention from the point of view of hydrocarbon presence.

It is known that several factors influencing the form of logging curves must be taken into account while facies interpretation. These include granulometric composition, porosity, clay content, brine water, drilling mud composition, borehole diamater, etc. In this respect, analysis of spontaneous polarization and GL (Gamma Log) curves for evaluation of sedimentation are not clear [9, 10].

* ✉ kifageo.com@rambler.ru
https://orcid.org/0000-0001-8753-8791
**qeniyevsamir89@gmail.com
https://orcid.org/0000-0003-2808-3760

Research methodology

Well logging techniques applying jointly with quantitative evaluations, well logging curves, effective porosity of layers, curves of variation of bulk clay versus depth allow to derive more accurate lithological composition, as well as genesis and sedimentation environment of deposits. In distinction to other techniques this method is based on accurate values of oil-field geophysical parameters while analysis of lithological characteristics of rocks [11].

Due to this, comparative analysis of lithological features of rocks in Kirmaky suite (Productive Series) by use of "quantitative and qualitative models of log facies" allowed to derive their genesis and the results is expounded in this paper [12, 13].

The Table shows effective porosity and bulk clay in reservoir layers defined by use of log diagrams across studied sections.

Based on Table the bulk clay and effective porosity versus depth histograms has been drawn and genesis of sediments has been studied by the display forms of these histograms. By display form of these histograms the conditional well N1 section in Binagadi field is characterized for genetic origin of rocks as the following (Fig.1).

It can be seen from Fig. 1 that rocks of Kirmaky suite in conditional X4 well section in Pirallahi field consists of alluvial and deltaic sediments which are characterized by gradual replacement of near-coastal marine facies by flow-originated facies in upward direction. Flow-originated facies are overlaid by thin bar facies, replaced again by flow facies. Near-coastal marine facies are observed at 459–467 m depth interval. These facies are again replaced by flow-bar originated facies.[14, 15]

Similar analysis has been done for sections of conditionally numbered wells X1, X2, X3 and X5 of Pirallahi field.

It can be seen from the Fig. 2 that Kirmaky suite rocks studied in conditional X1 well consist of alluvial and deltaic deposits with upward gradual replacement of bar-originated facies by coastal plain facies. Coastal plain facies are also overlaid by flow and bar-originated facies. At 775–625 m depth interval the coastal plain facies are alternating with flow-originated facies. From 625 m depths the bar-originated, coastal plain facies are observed.

Fig. 2 displays correlation of similar facies of Kirmaky suite in sections of conditionally numbered wells X1, X2, X3 and X5 of Pirallahi field. It can be seen from the figure that flow and bar orginated, as well as coastal plain facies are traced along well X5 section. However, it must be noted that coastal marine facies are observed only in two various intervals of X4 well section. These features of sedimentation process can be related to sea level regression and transgression.

Evaluation of effective porosity and bulk clay variation in rocks versus depth according to integrated interpretation of log diagrams acquired for well sections of Pirallahi field.

Оценка эффективной пористости и вариации глины в горных породах в зависимости от глубины согласно интегрированной интерпретации каротажных диаграмм, полученных для скважинных участков месторождения Пираллахи.

Number	Top	Foot	Porosity	Clay
1	555.6	559.0	0.225	0.075
2	559.7	561.9	0.224	0.173
3	565.3	566.5	0.222	0.186
4	567.0	568.2	0.192	0.268
5	568.9	570.5	0.209	0.277
6	572.8	574.1	0.185	0.354
7	577.2	581.7	0.167	0.353
8	590.2	591.3	0.199	0.324
9	596.0	597.2	0.189	0.328
10	606.2	607.5	0.164	0.309
11	608.6	611.1	0.182	0.286
12	613.7	617.1	0.163	0.352
13	619.9	621.1	0.177	0.355
14	624.9	629.6	0.159	0.353
15	634.9	639.1	0.194	0.221
16	643.3	645.4	0.201	0.358
17	646.4	648.4	0.217	0.224
18	649.6	651.9	0.181	0.357
19	652.9	657.8	0.158	0.350
20	663.2	667.7	0.154	0.359
21	670.7	673.0	0.159	0.355
22	676.1	676.9	0.206	0.352
23	680.5	685.0	0.168	0.350
24	697.0	699.7	0.167	0.349
25	702.2	704.7	0.184	0.188
26	706.9	709.1	0.203	0.169
27	710.4	713.2	0.169	0.354
28	718.5	720.4	0.207	0.295
29	721.8	723.2	0.175	0.350
30	725.7	727.0	0.204	0.317
31	734.5	736.0	0.191	0.353
32	737.2	738.5	0.198	0.336
33	748.6	749.8	0.229	0.294
34	751.1	754.0	0.177	0.351
35	756.4	759.3	0.160	0.349
36	765.0	766.5	0.172	0.319

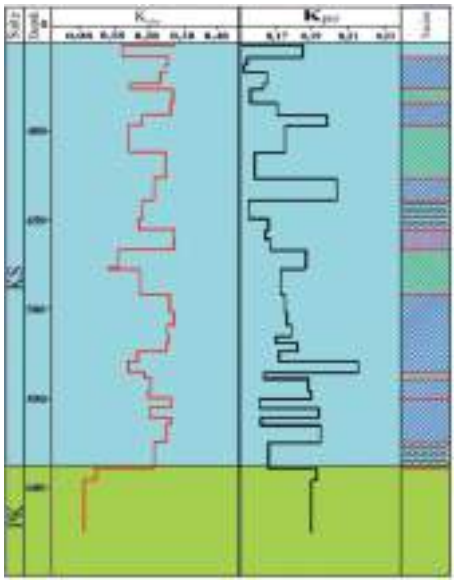


Figure 1. Analysis of lithological characteristics of rocks attributed to Kirmaky suite (KS) of Productive Serie (PS) studied in conditional X1 well section in Pirallahi field. K_{clay} – clayiness coefficient; K_{por} – porosity coefficient.

Рисунок 1. Анализ литологических характеристик пород, относящихся к Кирмаки свите (КС) продуктивной толщи (ПТ), изученной в условном разрезе скважины X1 месторождения Пираллахи. K_{clay} – коэффициент глинистости; $K_{пор}$ – коэффициент пористости.

The study also covered analysis of sedimentation environment by GL curves with further correlation (Fig. 2). Comparative analysis of Fig. 2 and Fig. 3 by use of quantitative analysis allowed to group sediments as flow-originated, bar and coastal facies. Based on features of GL curves these groups have been further divided into sub-groups of facies.

For conditionally numbered X1 well Upper-Kirmaky sand suite involves mainly bar-originated facies. Gala suite facies are featured as the following: 525–575 m depth involves bar-originated facies, 575–625 m depth interval consists of coastal plain and bar originated facies, 675–725 m depth interval involves bar-coastal-flow facies, 725–775 m depth interval consists of alternation of bar-flow-coastal-bar facies.

Facies variation in section of conditionally numbered well X2 is observed only is Gala series: 400–450 m interval consists of alternation of bar-flow-bar facies, 450–500 m – bar-coastal marine-flow facies, 500–550 m depth interval – flow originated facies.

Similar to X2 the section of conditionally numbered well X3 is interpreted only for Gala suite. 450–500 m depth interval involves bar facies, 500–600 m depths interval involves alternation of bar and flow originated facies, 600–650 m depth interval the coastal-bar-flow originated facies and 650–700 m depth interval bar-flow originated facies are observed.

Gala suite has been analysed for conditionally numbered X4 well. The interpretation sequence is as the following: 300–400 m depth interval is characterised by alternation of flow-bar facies, 400–450 m depth interval consists of bar-flow originated-coastal facies, 450–500 m depth interval consists of coastal – bar, at 500–600 m depth interval the flow originated facies are dominating.

Sedimentation environment of Gala and Post-Kirmaky suites has been analysed for section of conditionally numbered X5 well. Facies vary as the following: 450–500 m involves bar-originated facies, 500–600 m depth interval is featured by the dominance of flow originated facies and we may observe the alternation of coastal plain and bar facies also. At 600–700 m depth interval of Gala suite the alternation of bar facies is observed. In Post-Kirmaky suite and at 750 m depth interval the coastal plain facies were identified.

Bulk clay and effective porosity are dynamic parameters of reservoirs. These two parameters are depends on some factors. There are intensive and dynamic relation between these parameters. Fig. 4 shows the correlation relation between bulk clay and effective porosity for any 1st well sections of Pirallahi field on studied KS suite.

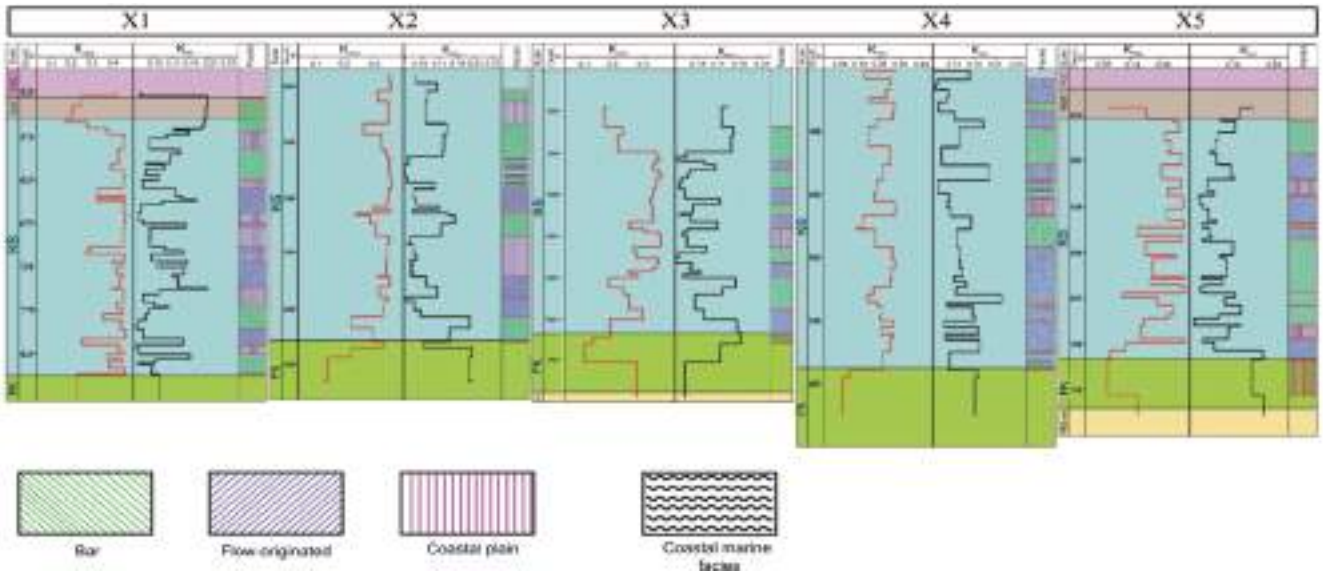


Figure 2. Lithlogy and facies of Kirmaky suite (KS) rocks of Productive Series (PS) studied based on well data from Pirallahi field. K_{clay} – clayiness coefficient; K_{por} – porosity coefficient; PK – Post-Kirmaky; KUS – Kirmaky Upper Sand; KUC – Kirmaky Upper Clay.

Рис. 2. Литология и фации пород кирмакской свиты (КС) продуктивной серии (ПС), изученных на основе данных скважин с месторождения Пираллахи. K_{clay} – коэффициент глинистости; $K_{пор}$ – коэффициент пористости; ПК – Пост-Кирмаки; КВП – Кирмаки Верхний Песок; КВГ – Кирмаки Верхняя Глина.

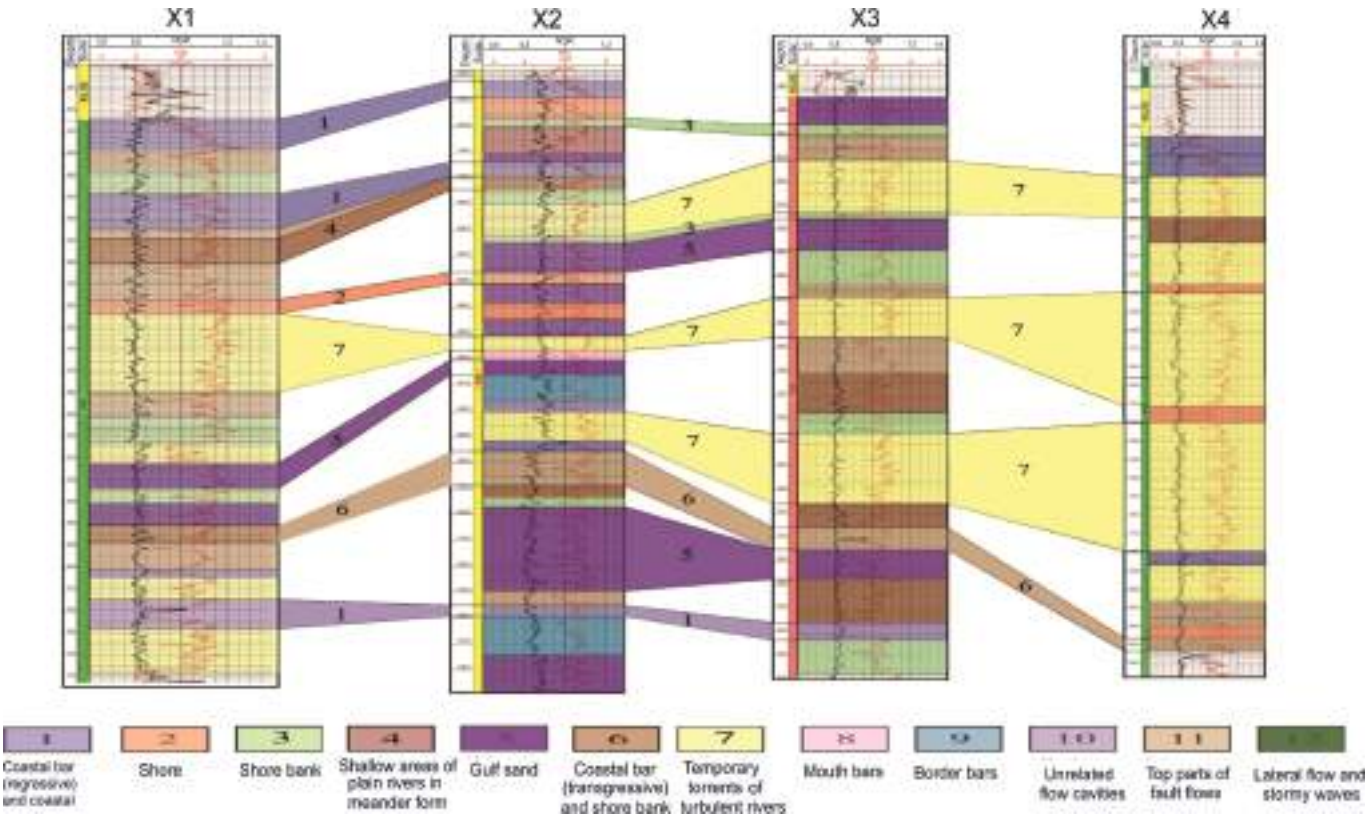


Figure 3. Analysis and tracing of facies based on qualitative interpretation of data acquired from well sections of Pirallahi field. K_{clay} – clayiness coefficient; K_{por} – porosity coefficient.

Рисунок 3. Анализ и отслеживание фаций на основе качественной интерпретации данных, полученных из скважинных участков месторождения Пираллахи. K_{clay} – коэффициент глинистости; $K_{пор}$ – коэффициент пористости.

It can be seen from dependence graph that regression equation $K_{por} = -2{,}537\ K_{clay} + 0{,}7689$ characterized between bulk clay and effective porosity with high correletion coefficient (r = 0,716) is getting. This correletion relation is also significancy for dividing litotypes of cross-section. As can be seen from the figure that litotype with 35,9 % of bulk clay has 15,4 % of porosity, the effective porosity of the lithotype with a bulk clay of 7.5 % was estimated at 22.5 %.

Integrated well logging data acquired in five wells in the study area have been processed by use of Neuralog software and data acquired by LL, SP, GL, NGL and other log diagrams have been transformed into LAS format. Then by use of Petrel software package the permeability (Fig. 5), porosity (Fig. 6), oil-gas saturation (Fig. 7), bulk clay (Fig. 8) models have been designed applying appropriate formula. It can be seen from Fig. 5 that the scale is logarithmic and permeability varies within 10–100 mD range.

Fig. 6 displays porosity characteristics in various wells. The lowest porosity value is within 2–10 %, while the highest value is within 22–34 % range.

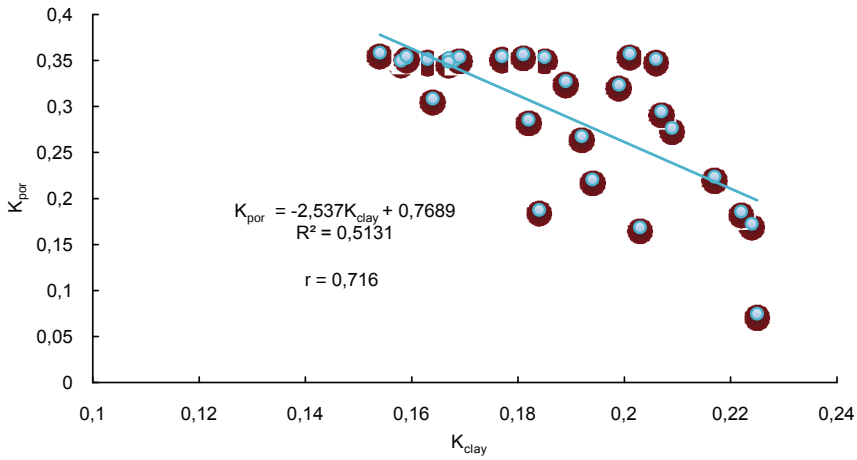


Figure 4. Correlation relation between bulk clay and effective porosity for any 1st well sections of Pirallahi field.

Рисунок 4. Соотношение корреляции между глиной и эффективной пористостью для любых участков 1-й скважины месторождения Пираллахи.

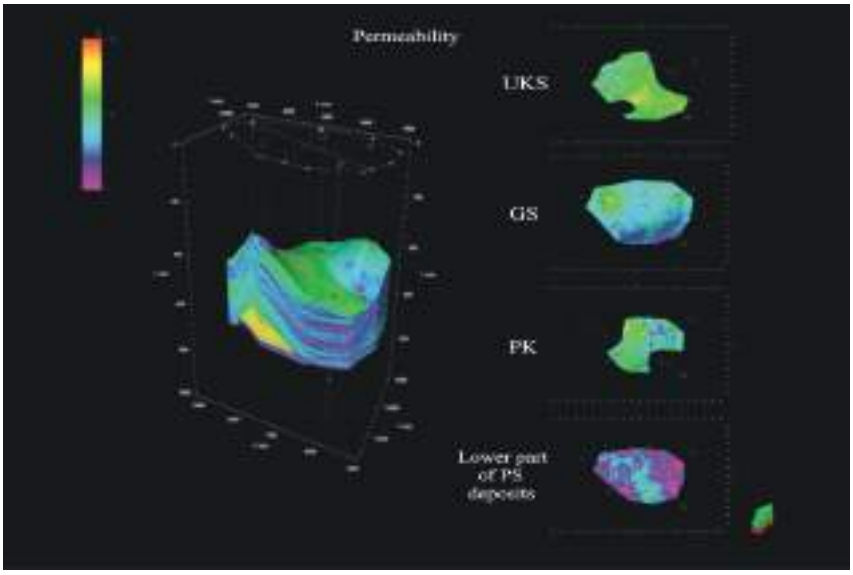


Figure 5. Permeability model of Upper-Kirmaky sand (UKS), Gala suite (GS), Post-Kirmaky (PK) and Lower part of PS deposits.
Рисунок 5. Модель проницаемости верхне-кирмакских песков (UKS), Гала-свиты (GS), Пост-Кирмаки (PK) и нижней части месторождений ПС.

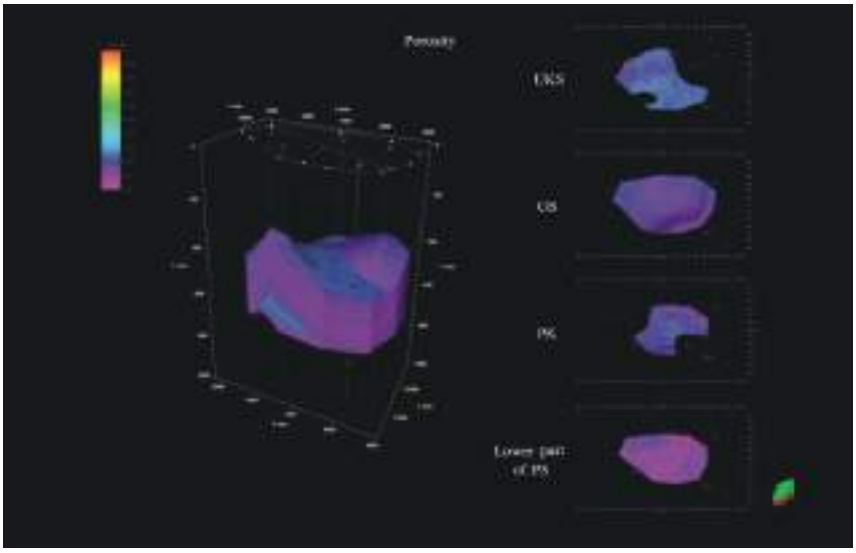


Figure 6. Porosity model of Upper-Kirmaky sand (UKS), Gala suite (GS), Post-Kirmaky (PK) and lower part of PS deposits.
Рисунок 6. Модель пористости верхне-кирмакского песка (UKS), Гала-свиты (GS), Пост-Кирмаки (PK) и нижней части месторождений ПС

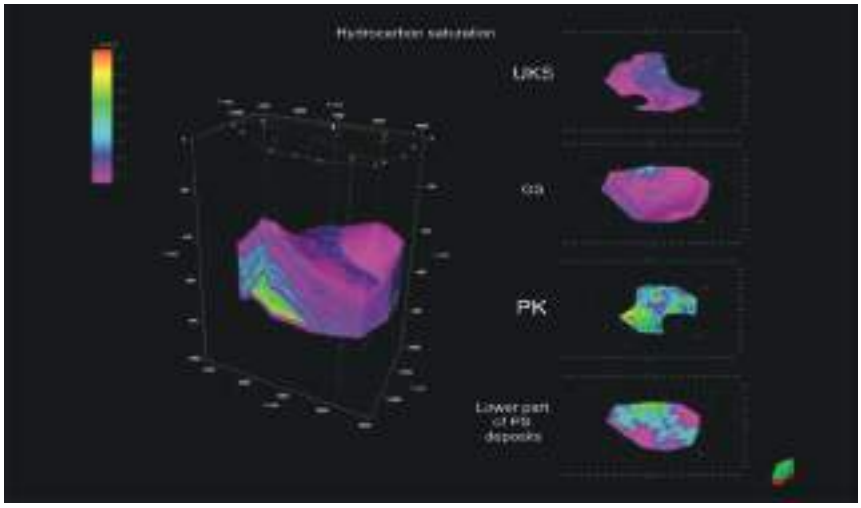


Figure 7. Hydrocarbon saturation model of Upper-Kirmaky sand (UKS), Gala suite (GS), Post-Kirmaky (PK) and lower part of PS deposits.
Рисунок 7. Модель насыщения углеводородами верхнекирмакского песка (UKS), Гала свиты (GS), Пост-Кирмаки (PK) и нижней части месторождений

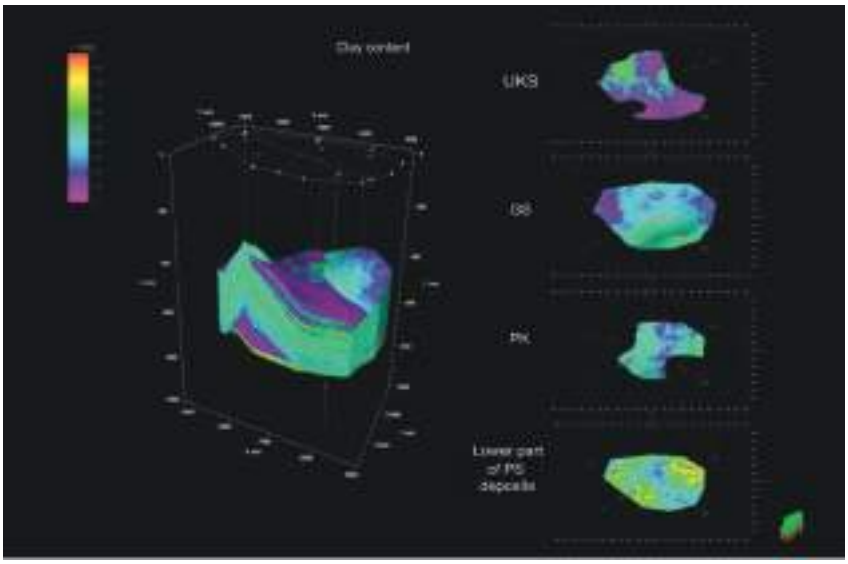


Figure 8. Clay content model of Upper-Kirmaky sand (UKS), Gala suite (GS), Post-Kirmaky (PK) and lower part of PS deposits.
Рисунок 8. Модель содержания глины в верхне-кирмакском песке (UKS), Гала-свите (GS), Пост-Кирмаки (PK) и нижней части месторождений ПС.

Fig. 7 depicts one of the most important characteristics of reservoir rocks as oil-gas saturation. The lowest oil-gas saturation values vary within 10%-20% ranges while the highest value vary within 60–70 % ranges.

Fig. 8 is designed on the basis of calculated quantity-clay, negatively impacting reservoir rocks. The highest clay coefficient varies within 0.35–0.48 and the lowest value varies within 0.07–0.18 range.

Conclusions

1. Based on well log data the quantitative and qualitative analysis has been done, sedimentation environment were evaluated, correlation diagrams have been drawn for facies variation across wells with further comparative analysis.

a) Based on quantitative analysis of X1, X2, X3, X4, X5 wells it is possible to trace bar-originated facies in the upper part of the diagram. Futher down the bar-originated facies are replaced by flow-originated and coastal facies. However, coastal marine facies are rare along well section.

б) Interpretation done on the basis of qualitative analysis of X1, X2, X3, X4 wells displays good correlation. Thus, temporary flows of speedily flowing rivers are dominating. Facies of coastal, offshore bar, shallow parts of plain rivers in a meander form and some other types are met here. Regressive flows (bars) are observed at lower borders and partially at upper borders. At the lower borders transgression is replaced by regression.

2. Porosity, permeability, clay, oil-gas saturation modeling results have been analyzed by use of Neurolog and Petrel software packages. It has been derived that permeability varies within 10–100 mD, the lowest value of porosity varies within 2–10 % ranges while the highest value varies within 22–34 %, the lowest value of oil-gas saturation varies within 10–20 %, the highest value varies within 60–70 %, the highest value of clay content varies as 35–48 % while the lowest value varies within 7–18 % ranges.

REFERENCES

1. Mamedov P. Z. 2008, *O prichinakh bystrogo progibaniya zemnoy kory v Yuzhno-Kaspiyskoy vpadine* [On the causes of rapid deflection of the earth's crust in the South Caspian depression]. *Azerbaydzhanskoye neftyanoye khozyaystvo* [Azerbaijan Oil Industry], no. 1, pp. 8–19.
2. Attia I., Helal I., El Dakhakhny A., Aly S. A. 2017, Using sequence stratigraphic approaches in a highly tectonic area: Case study – Nubia (A) sandstone in southwestern Gulf of Suez, Egypt. *Journal of African earth Science*, vol. 136, pp. 10–21. https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2017.06.001
3. Pereira P., Brevik E., Munoz-Rojas M., Miller B. 2017, Soil mapping and process modeling for sustainable land use management. Elsevier, 398 p.
4. Mineral deposits and metallogeny of Fennoscandia. P. Eilu (ed.). Geological survey of Finland, vol. 53, 401 p.
5. Scherer M. S., Goldberg K., Bardola T. 2015, Facies architecture and sequence stratigraphy of an early post-rift fluvial succession, Aptian Barbalha Formation, Araripe Basin, northeastern Brazil. *Sedimentary Geology*, vol. 322, pp. 43–62. http://dx.doi.org/10.1016%2Fj.sedgeo.2015.03.010
6. Mammadov P. Z, Kerimova K. A., Mammadova L. P. 2015, Study of facies composition of the Early Pliocene (Productive Series) deposits of South Caspian basin on the basis of well logging data. *Geophysics News in Azerbaijan*, no. 3-4, pp. 3–7.
7. Fadela A., Zigaite Z., Bloma H., Perez-Huertac A., Jeffrised T. et. al. 2015, Palaeoenvironmental signatures revealed from rare earth element (REE) compositions of vertebrate micro remains of the Vesak Bone Bed (Homerian, Wenlock), Saaremaa Island, Estonia. *Estonian Journal of Earth Science*, vol. 64, pp. 36–41.
8. Kocharli Sh. S. 2015, *Problemnyye voprosy neftegazovoy geologii Azerbaydzhana* [Problematic issues of oil and gas geology of Azerbaijan]. Baku, 278 p.
9. Kerimova K. A., 2009, Analysis of reservoir properties and genesis of sedimentary rocks of South Caspian basin. *Scientific newsletter "Karotajnik"*, no. 11(188), pp. 38–47.
10. Kerimova K. A. 2011, Genetic model of sedimentary rocks on the basis of integrated geophysical data acquired in the South Caspian basin thesis. Baku, 181 p.
11. Shilov G. Y., Jafarov I. S. 2001, Genetic models of sedimentary and volcanogenic rocks and facies interpretation techniques on the basis of geological-geophysical data. 393 p.
12. Kerimova K. A. 2014, Integrated interpretation of well data. Baku, 86 p.
13. Kerimova K. A., Seidov V. M., Mahmudov A. A., Alibekova E. T., Pashayeva Sh. V. 2015, *Litofatsial'naya korrelyatsiya produktivnoy tolshchi vdol' regional'nogo seysmicheskogo profilya v peredelakh khronostratigraficheskikh granits Yuzhno-Kaspiyskoy vpadiny v Apsheron-Pribalkhanskoy tektonicheskoy zone* [Lithafacial correlation of the productive strata along the regional seismic profile within the chronostratigraphic boundaries of the South-Caspian basin in the Absheron-Pribalkhan tectonic zone]. *Azerbaydzhanskoye neftyanoye khozyaystvo* [Azerbaijan Oil Industry], no. 3, pp. 10–14.

14. Seidov V. M. 2017, *Sostavleniye I analiz sedimentatsionnykh modeley protsessa osadkonakopleniya na osnove dannykh krivykh karotazha* [The compilation and analysis of sedimentation models of teh sedimentation process based on the data of the logging curves]. *Izvestiya vysshikh tekhnicheskikh uchebnykh zavedeniy Azerbaydzhana* [Transactions of Azerbaijan Institutes of Technology], no. 5 (109), pp. 23–33.
15. Erarslan C., Örgün Yü. 2017, Mineralogical and geochemical characterization of the Saray and Pinarhisar coals, Northwest Thrace Basin. Turkey. *International Journal of Coal Geology*, vol. 173, pp. 9–25. http://dx.doi.org/10.1016/j.coal.2017.01.015

The article was received on July 09, 2019

УДК 550.83 https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-3-90-97

Изучение генезиса продуктивных толщ по интегрированным данным скважин (на месторождении Пираллахи)

Кифаят Аладдин КЕРИМОВА*
Рейханксаним Яшар ГАНИЕВА**

Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности, Баку, Азербайджан

Актуальность. Известно, что более 90% добываемой в Азербайджане нефти добывается из Южно-Каспийского бассейна. Южно-Каспийский бассейн является одним из крупнейших глубоко залегающих бассейнов. Процесс седиментации здесь характеризуется высокой скоростью - 25 км в течение 150–170 млн лет (0,6–0,7 км / млн лет). В последние годы в связи с увеличением масштабов геологоразведочных работ в Южно-Каспийском бассейне и оценкой перспектив его углеводородов изучение генезиса продуктивных толщ вызывает интерес.
Цель работы. Целью работы является изучение генезиса отложений и осадконакопления на основе количественной и качественной интерпретации кривых каротажа, корреляции фаций в различных скважинах и проведения сравнительного анализа.
Метод исследования. Используя «Количественные и качественные модели каротажных фаций» на основе данных каротажа скважин, был проведен анализ литологии, фаций и генезиса осадочных пород в структуре Пираллахи и получены результаты. В рамках исследования с использованием программного обеспечения Neuralog, основанного на LL, SP, GL, NGL и других типах каротажа, данные были преобразованы в формат LAS, затем были разработаны модели проницаемости, пористости, нефтегазонасыщенности, изменения коэффициента объемной глины с использованием программного обеспечения Petrel.
Заключение. Изучение среды седиментации постоянно вызывает интерес геологов из-за прямой зависимости структуры и идентификации нефтегазовых ловушек от среды седиментации. Данная статья посвящена изучению генезиса месторождений продуктивной толщи на основе количественного и качественного анализа кривых каротажа. Целью исследования является свита Кирмаки на месторождении Пираллахи Апшеронского нефтегазоносного района.

Ключевые слова: фациальный анализ, каротажная фация, генезис, добыча, жила, береговая равнина.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мармедов П. З. О причинах быстрого прогибания земной коры в Южно-Каспийской впадине // Нефтяная промышленность Азербайджана. 2008. № 1. С. 8–19.
2. Аттиа И., Хелал И., Эль-Дахахны А., Али С. А. Применение стратиграфических подходов в высокотектонической зоне: тематическое исследование – песчаник Нубия (А) в юго-западной части Суэцкого залива, Египет // Журнал африканских наук о Земле. 2017. Вып. 136. С. 10–21. https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2017.06.001
3. Перейра П., Бревик Е., Муньос-Рохас М., Миллер Б. Картографирование почвы и моделирование процессов для устойчивого управления землепользованием. 2017. Elsevier. 398 с.
4. Минеральные месторождения и металлогения Фенноскандии / П. Эйлу (ред.). Геологическая съемка Финляндии. Вып. 53. 401 p.
5. Шерер М. С., Гольдберг К., Бардола Т. Фациальная архитектура и стратиграфия толщ ранней пострифтовой речной сукцессии, формация Аптиан Барбалья, бассейн Арарипе, северо-восточная Бразилия // Осадочная геология. 2015. Вып. 322. С. 43–62. http://dx.doi.org/10.1016%2Fj.sedgeo.2015.03.010
6. Мамедов П. З., Керимова К. А., Мамедова Л. П. Изучение фациального состава отложений раннего плиоцена (продуктивной толщи) Южно-Каспийского бассейна на основе данных каротажа скважин // Новости геофизики в Азербайджане. 2015. № 3/4. С. 3–7.
7. Фадела А., Зигайте З., Блома Х., Перес-Уэртак А., Джеффрис Т. и др. Палеоэкологические признаки, выявленные по составам редкоземельных элементов (РЗЭ) микроостатков позвоночных костяной брекчии Весак (Гомериан, Венлок), остров Сааремаа, Эстония // Эстонский журнал наук о Земле. 2015. Вып. 64. С. 36–41.
8. Кочарли Ш. С. Проблемные вопросы нефтегазовой геологии Азербайджана. Баку, 2015. 278 с.
9. Керимова К. А. Анализ коллекторских свойств и генезиса осадочных пород Южно-Каспийского бассейна // Научный бюллетень «Каротайник». 2009. № 11 (188). С. 38–47.
10. Керимова К. А. Генетическая модель осадочных пород на основе комплексных геофизических данных, полученных в диссертации Южно-Каспийского бассейна. Баку, 2011. 181 с.
11. Шилов Г. Ю., Джафаров И. С. Генетические модели осадочных и вулканогенных пород и методы интерпретации фаций на основе геолого-геофизических данных. 2001. 393 с.
12. Керимова К. А. Комплексная интерпретация скважинных данных. Баку, 2014. 86 с.
13. Керимова К. А., Сеидов В. М., Махмудов А. А., Алибекова Е. Т., Пашаева Ш. V. Литофациальная коррекция продуктивной толщи в регионе регионального сейсмического профиля в переделах хроностратиграфических гранитов Южно-Каспийской впадины в Апшерон-Прибалханской тектонической зоне // Азербайджанское нефтяное хозяйство. 2015. № 3. С. 10–14.
14. Сеидов В. М. Составление и анализ седиментационных моделей процесса осадконакопления на основе данных кривых каротажа // Изв. втузов Азербайджана. 2017. № 5 (109). С. 23–33.
15. Эрарслан С., Ёргюн Ю. 2017. Минералого-геохимическая характеристика угольных месторождений Сарай и Пинарисар, Северо-Западный Фракийский бассейн. Турция // Международный журнал по геологии угля. 2017. Вып. 173. С. 9–25. http://dx.doi.org/10.1016/j.coal.2017.01.015

Статья поступила в редакцию 09 июля 2019 г.

* ✉kifageo.com@rambler.ru
https://orcid.org/0000-0001-8753-8791
**qeniyevsamir89@gmail.com
https://orcid.org/0000-0003-2808-3760

УДК 622.285.4: 624.191.6 https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-3-98-103

Результаты теоретических и лабораторных исследований спасательного комплекса для угольных шахт

Рустам Юсуфович УРАЗБАХТИН*,
Дмитрий Алексеевич ЮНГМЕЙСТЕР**

Санкт-Петербургский горный университет, Россия, Санкт-Петербург

Актуальность работы обусловлена возможностью создания спасательного комплекса для проведения скоростных подземных выработок малого сечения (2,25 м), главной задачей которого является эвакуация шахтеров, застигнутых аварией.
Цель работы: обоснование силовых и конструктивных параметров гидродомкратов передвижки спасательного комплекса при проходке эвакуационной выработки по массивам пород переменной крепости, кровлям различной устойчивости на основе установленных зависимостей конструктивных параметров такого комплекса от давления кровли на перекрытия для увеличения скорости проходки комплексом эвакуационных выработок малого сечения в сложных горно-геологических условиях.
Методология исследования. Использован системный подход, включающий аналитические и вычислительные методы с применением математического моделирования, а также классических положений теоретической механики.
Результаты и их применение. Теоретически установлено усилие передвижки спасательного комплекса от массы ее частей, крепости пород, выражающейся в установившемся режиме степенной зависимостью от времени и шага передвижки, причем теоретическое значение величины коэффициента сопротивления движению спасательного комплекса находится в интервале 0,4–6, что подтверждается экспериментально с использованием лабораторного стенда.
Выводы. Рассмотрены особенности работы спасательного комплекса при различных крепостях пород в выработке, предложены рекомендации по выбору силового оборудования комплекса.

Ключевые слова: спасательный комплекс, шагающая крепь, скорость проходки, коэффициент сопротивления движению, горноспасательные работы.

Введение

Уголь – важнейший ресурс в энергетическом балансе многих стран мира, в частности Китая, Индии, США, России [1], но его добыча сопровождается тяжелейшими условиями работы и риском для жизни шахтеров. Меры, предпринимаемые для предотвращения аварийных ситуаций на угольных шахтах, заметно снизили аварийность на них, но задача спасения людей по-прежнему остается актуальной [2–8].

Для шахт актуальным является создание спасательного комплекса, состоящего из быстросборных узлов облегченного типа, при условии, что скорость проходки эвакуационной выработки спасательным комплексом выше, чем при проведении выработки ручным способом. Использование спасательного комплекса существенно снизит травмоопасные ситуации для горноспасателей, находящихся в зоне риска. Конструкция спасательного комплекса запатентована [9].

Методология исследования

Теоретические исследования спасательного комплекса для определения рациональных параметров силового оборудования при переменной крепости пород в забое основаны на решении уравнения баланса сил при передвижке нагруженного комплекса [10–13]. Из рис. 1 видно, что точное определение величины силы $F_м$ позволяет обосновать схему нагрузки перекрытий крепи и ее ограждений, рассчитать основные конструктивные параметры частей крепи, на основе которых обоснованно выбрать силовое оборудование (гидроцилиндры, маслостанцию, соединительные и крепежные элементы и пр.)

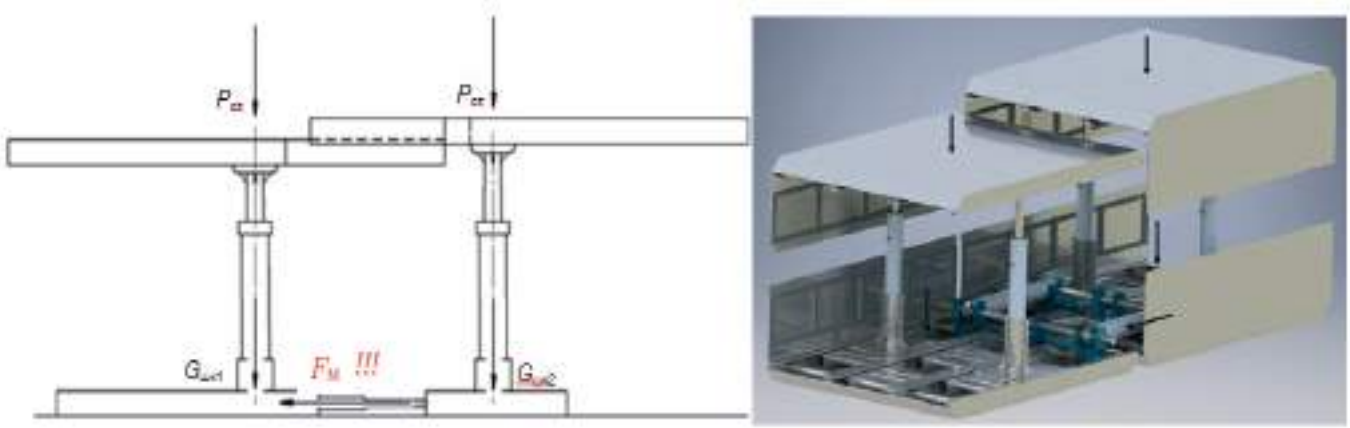


Рисунок 1. Схема процесса перемещения секций спасательного комплекса при установившемся режиме работы.
Figure 1. Diagram of the process of moving sections of the rescue complex at steady state operation.

* ruraz@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-2913-5641
**iungmeister@yandex.com
https://orcid.org/0000-0001-7858-8340

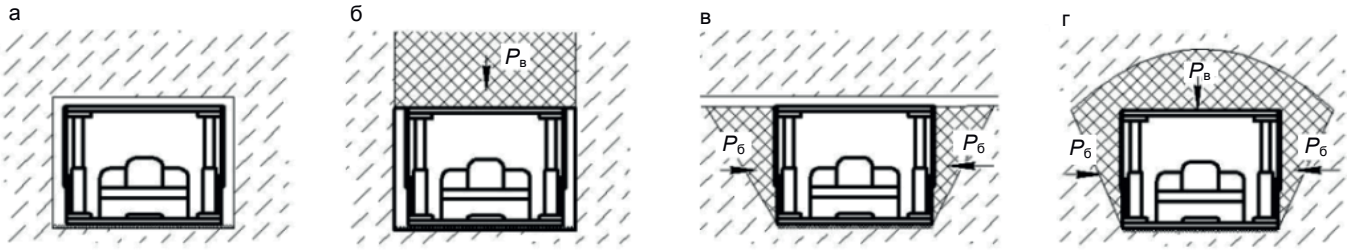


Рисунок 2. Варианты нагружения спасательного комплекса. а – отсутствие внешних нагрузок на перекрытия комплекса; б – нагружение со стороны кровли выработки; в – нагружение со стороны боков выработки; г – нагружение со стороны кровли и боков выработки.
Figure 2. Loading options for the rescue complex. а – lack of external loads on the floors of the complex; б – loading from the side of the roof; в – loading from the side of the working sides; г – loading from the side of the roof and sides of the working.

На рис. 2 представлены варианты нагружения спасательного комплекса при различных вариантах обрушения кровли и боков выработки.

Область влияния горной выработки на перекрытия секции комплекса, вызванная перераспределением напряжений в массиве пород, зависит от формы и наибольшего линейного размера l сечения выработки. Зона трещиноватости при нагружении перекрытий секций комплекса не учитывалась, поскольку напряжения в массиве трещиноватых пород не превосходят предел прочности и не воздействуют на перекрытия комплекса.

При движении комплекса в установившемся режиме с постоянной скоростью формула усилия передвижки спасательного комплекса примет вид:

$$F_м = G_{шк\,i} k_{сопр}, \tag{1}$$

где $G_{шк\,i}$ – вес головной или концевой частей комплекса; $k_{сопр}$ – коэффициент сопротивления перемещению частей комплекса, $k_{сопр}$ = 0,4–6.

Значения коэффициента сопротивления перемещению имеет широкий диапазон варьирования, обусловленный вариантом нагружения комплекса (рис. 2). По результатам теоретических исследований определен интервал значений коэффициента сопротивления перемещению спасательного комплекса:

1) отсутствие внешних нагрузок на перекрытия комплекса (рис. 2, а) $k_{сопр}$ = 0,4–0,6, определяется по формуле [14]:

$$k_{сопр} = \mu, \tag{2}$$

где μ – коэффициент сопротивления перемещению стальных поверхностей оснований секции крепи по породе, μ = 0,4–0,6.

2) нагружение со стороны кровли выработки (рис. 2, б) $k_{сопр}$ = 0,5–3, определяется по формуле [14]:

$$k_{сопр} = \mu\left(1 + \frac{2\left(g\rho 2alb\right)}{G_{шк\,i}}\right), \tag{3}$$

где g – ускорение свободного падения, g = 9,8 Н/кг; ρ – плотность пород, кг/м^3; a – полупролет свода, м; l, b – длина, высота свода обрушения, м.

Высота свода обрушения определяется по формуле [14]:

$$b = \frac{a}{f}, \tag{4}$$

где f – коэффициент крепости по классификации М. М. Протодьяконова для связных пород и коэффициент внутреннего трения для мягких пород.

3) нагружение со стороны боков выработки (рис. 2, в) $k_{сопр}$ = 0,4–0,85, определяется по формуле [14]:

$$k_{сопр} = \mu\left(1 + \frac{2\left(\frac{g\rho h^2 l}{2}\operatorname{tg}^2\frac{90^\circ - \varphi}{2}\right)}{G_{шк\,i}}\right), \tag{5}$$

где h – высота выработки; θ – угол сползания боковых пород; φ – угол внутреннего трения, φ = arctg f.

4) нагружение со стороны кровли и боков выработки (рис. 2, г) $k_{сопр}$ = 0,5–6, определяется по формуле [14]:

$$k_{сопр} = \mu\left(1 + \frac{2\left(g\rho 2al\left[(a+h)\operatorname{ctg}\left(\frac{90^\circ + \varphi}{2}\right)\right]\right)}{G_{шк\,i}} + \frac{2\left(\frac{g\rho hl}{2}\left(2b_1 + h\right)\operatorname{tg}^2\left(\frac{90^\circ - \varphi}{2}\right)\right)}{G_{шк\,i}}\right). \tag{6}$$

Высота свода обрушения определяется по формуле [14]

$$b_1 = \frac{a_1}{f} = \frac{(a+h)\,\mathrm{ctg}\left(\frac{90^\circ + \varphi}{2}\right)}{\mathrm{tg}\,\varphi}, \tag{7}$$

где a_1 – полупролет свода естественного равновесия, м.

Результаты первого цикла экспериментов позволили построить диаграмму зависимости усилия передвижки $F_м$, Н, от времени t, с, при постоянном значении скорости передвижки v = 0,1 м/с и шаге передвижки l = 0,2 м (рис. 3).

Усилие передвижки секции спасательного комплекса при переходе от параметров модели к параметрам оригинала определяется по формуле

$$F_н = F_м k_m, \tag{8}$$

где k_m – масштабный коэффициент; $F_м$ – экспериментальное значение усилия передвижки модели спасательного комплекса.

Масштабный коэффициент определяется по формуле

$$k_m = \frac{m_н}{m_м}, \tag{9}$$

где $m_н$ – масса секции спасательного комплекса (оригинал); $m_м$ – масса модели секции спасательного комплекса.

Наибольшее значение усилия передвижки модели спасательного комплекса проявляется при нагружении боковых стенок и перекрытий модели комплекса со стороны кровли и боков выработки (рис. 3, п. 4) и составляет ($F_м$ = 233,78 Н). С учетом масштабного коэффициента (k_m = 500) при переходе от параметров модели к параметрам оригинала значения усилия передвижки секции спасательного комплекса и коэффициента сопротивления перемещению составляют $F_н$ = 116,9 кН и $k_{сопр}$ = 5,9), что подтверждает значения, полученные теоретически ($F_м$ = 120 кН и $k_{сопр}$ = 6).

Обоснование выбора гидродомкрата шагающей крепи

На рис. 4 показана номограмма определения типов гидродомкрата на основе определенного интервала изменения коэффициента сопротивления перемещению шагающей крепи в зависимости от коэффициента крепости пород с учетом методики выбора основных характеристик гидравлических цилиндров [15] при использовании параметрических рядов диаметров поршней и давлений гидравлической системы.

Для упрощения указанных формул зависимость коэффициента сопротивления перемещению элементов ПСК при нагружении со стороны кровли и боков выработки (рис. 4, п. 4) может быть выражена степенной зависимостью вида $k_{сопр}(f) = 4{,}3959f^{-0{,}802}$, причем параметры 4,395 и –0,802 установлены методами аппроксимации и учитывают влияние на $k_{сопр}$ величин масс, действующих на перекрытия комплекса, представленных в формулах (1)–(7).

В соответствии с крепостью пород в выработке по шкале М. М. Протодьяконова выбирается наибольшее значение коэффициента сопротивления перемещению шагающей крепи, которое соответствует неблагоприятным горно-геологическим условиям, при которых значения вертикальной и боковых нагрузок, действующих на перекрытия, боковые стенки крепи со стороны кровли и боков выработки, максимальны. На основе коэффициента сопротивления перемеще-

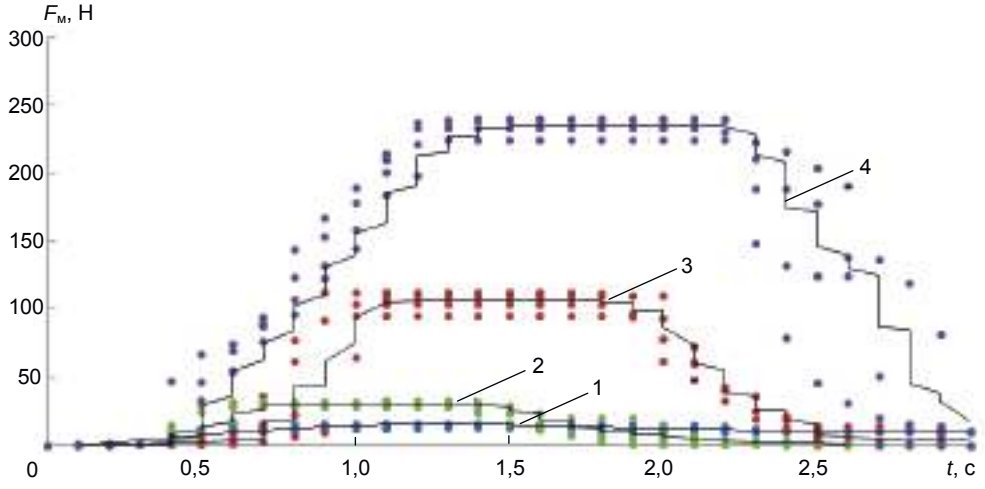


Рисунок 3. Зависимости усилия передвижки модели крепи в образцах известняковых пород от времени. 1 – без нагружения модели; 2 – при нагружении боковыми нагрузками, действующими на боковые стенки модели крепи со стороны боков выработки; 3 – при нагружении вертикальной нагрузкой, действующей на перекрытия модели со стороны кровли выработки; 4 – при нагружении вертикальной и боковыми нагрузками, действующими на перекрытия, боковые стенки модели крепи со стороны кровли и боков выработки.

Figure 3. The time dependence of the effort of moving the props model in the samples of limestone rocks. 1 – without loading the model; 2 – when loading with lateral loads acting on the side walls of the props model from the side of the working sides; 3 – when loading with a vertical load acting on the overlap of the model from the roof of the mine; 4 – when loading with vertical and side loads acting on the overlap, the side walls of the props model from the roof and side of the mine.

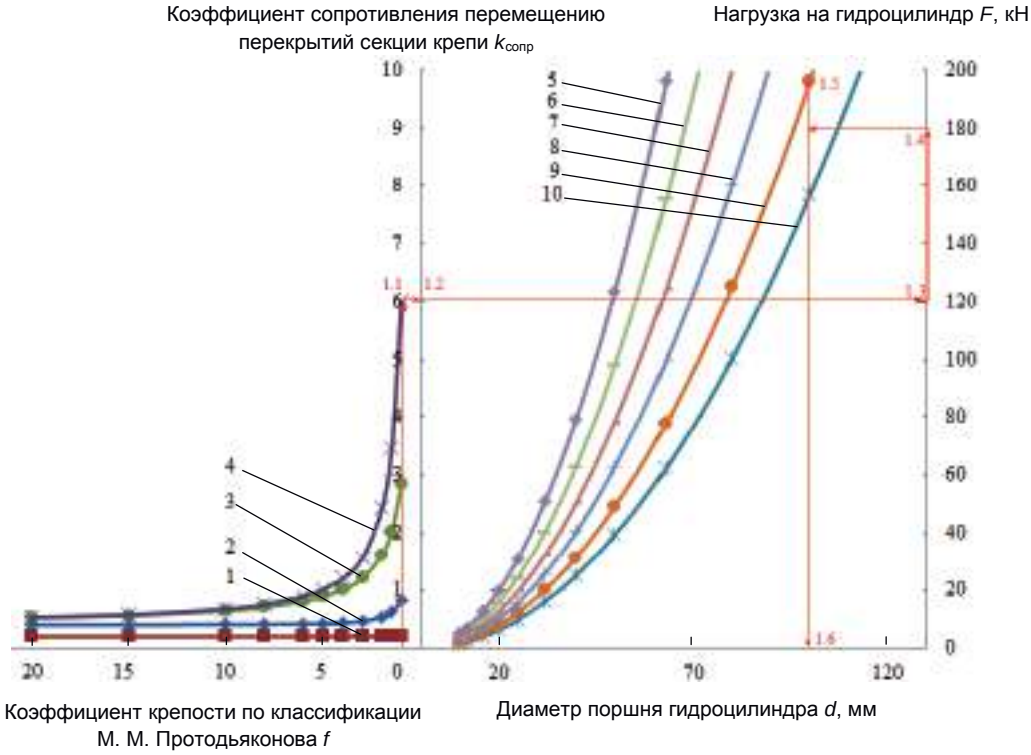


Рисунок 4. Номограмма определения типов гидродомкрата на основе силовых параметров гидроцилиндров в зависимости от коэффициента крепости пород в выработке по шкале М. М. Протодьяконова. 1 – график теоретической зависимости коэффициента крепости пород от коэффициента сопротивления перемещению шагающей крепи при отсутствии нагрузки на перекрытия и стенки крепи; 2 – при наличии боковых нагрузок, действующих на боковые стенки крепи со стороны боков выработки; 3 – при наличии вертикальной нагрузки, действующей на перекрытия крепи со стороны кровли выработки; 4 – при наличии вертикальной и боковых нагрузок, действующих на перекрытия, боковые стенки крепи со стороны кровли и боков выработки; 5 – зависимость усилия передвижки от диаметра поршня при давлении в гидравлической сети 63 МПа; 6 – 50 МПа; 7 – 40 МПа; 8 – 32 МПа; 9 – 25 МПа; 10 – 20 МПа.

Figure 4. Graphic chart for determining the types of advancing ram based on the power parameters of hydraulic cylinders depending on the rock strength coefficient in the mine according to the M. M. Protodyakonov scale. 1 is a graph of the theoretical dependence of the rock strength coefficient on the resistance coefficient to the movement of walking props in the absence of load on the floors and walls; 2 – in the presence of lateral loads acting on the side walls of the props from the sides of working; 3 – in the presence of a vertical load acting on the roof props from the roof of the mine; 4 – in the presence of vertical and lateral loads acting on the overlap, the side walls of the props on the side of the roof and the sides of the mine; 5 – dependence of the driving force on the diameter of the piston at a pressure in the hydraulic network of 63 MPa; 6 – 50 MPa; 7 to 40 MPa; 8 – 32 MPa; 9 – 25 MPa; 10 to 20 MPa.

нию шагающей крепи выбирается гидродомкрат передвижки крепи (с учетом коэффициента запаса), обеспечивающий необходимое усилие передвижки в зависимости от диаметра поршня гидродомкрата и давления в гидравлической сети.

Так, например, при крепости пород в выработке по шкале М. М. Протодьяконова $f = 1$ максимальное теоретическое значение коэффициента сопротивления перемещению шагающей крепи $k_{сопр} = 6$, которое соответствует неблагоприятным горно-геологическим условиям, при которых значения вертикальной и боковых нагрузок, действующих на перекрытия, боковые стенки крепи со стороны кровли и боков выработки, максимальны (точки 1.1, 1.2 на рис. 4). При известном значении коэффициента сопротивления крепи определяется необходимое рабочее усилие, развиваемое гидродомкратом передвижки крепи ($F_м = 120$ кН) (точка 1.3 на рис. 4). Дальнейшее определение усилия передвижки крепи осуществляется с учетом коэффициента запаса $k_з = 3$ [15] и количества гидродомкратов $n = 2$, обеспечивающих передвижку крепи. Таким образом, усилие гидродомкрата должно быть не меньше 180 кН (точка 1.4 на рис. 4).

В соответствии с параметрическими рядами диаметров поршней гидроцилиндров и номинальных давлений в гидравлической сети значение усилия гидродомкрата передвижки крепи уточняется (точка 1.5 на рис. 4, $F = 196$ кН) при диаметре поршня гидродомкрата $d = 100$ мм (точка 1.6 на рис. 4) и давлении в гидравлической сети $p = 25$ МПа.

Выбор гидродомкрата передвижки основывался на максимальном расчетном значении коэффициента сопротивления перемещению шагающей крепи $k_{сопр} = 6$, соответствующем неблагоприятным горно-геологическим условиям, при которых значения вертикальной и боковых нагрузок, действующих на перекрытия, боковые стенки крепи со стороны кровли и боков выработки, максимальны, и наименьшем значении диаметра поршня и давления в гидравлической сети. Тем самым обеспечивался выбор малогабаритных и быстросборных узлов комплекса облегченного типа.

Заключение

Предложена конструкция спасательного комплекса на основе расчета базового параметра $F_м$, рассчитанного аналитически с подтверждением лабораторных экспериментов. Даны алгоритмы и номограммы по определению силовых параметров комплекса. Расчеты показали, что для широкого спектра различных по крепости и другим показателям массивов может быть разработан универсальный комплект оборудования для создания спасательного комплекса. Основными достоинствами такого комплекса являются высокая скорость проведения аварийно-спасательных выработок, простота работы и сборки, а также возможность быстрой доставки частей и узлов комплекса к месту начала проведения

спасательной операции, поскольку масса наиболее тяжелых узлов не превышает 200 кг, что позволяет горноспасателям переносить эти узлы вручную по наиболее тяжелым участкам выработки. Оснащение горноспасательных подразделений таким комплексом позволит снизить время проведения спасательных работ, а также снизит травматизм среди горноспасателей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Писаренко М. В. Перспективы производства и потребления угля в мире, России и Кузбассе // Уголь Кузбасса. 2013. № 5(031). С. 8–12.
2. Годовой отчет по деятельности федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2017 году // Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору. М., 2018. 420 с.
3. Пелих С. Г., Родимов В. В., Борязяк В. Е., Шаповалов В. П. Анализ инженерных решений при спасении людей на шахтах «Западная-Капитальная» ООО «Компания «Ростовуголь» // ГИАБ. 2005. № 2. С. 191–193.
4. Федорин В. А., Шахматов В. Я., Анферов Б. А. Технологические аспекты разработки мощных пологих угольных пластов в сложных горно-геологических условиях Кузбасса // ГИАБ. 2013. № 11. С. 24–27.
5. Fiscor S. 2010, Rescuers work to free chilean miners. Engineering and Mining Journal, vol. 211(8), pp. 24–26.
6. Kral S. 2010, Remarkable rescue unfolds. Mining Engineering, vol. 62(9), P. 96
7. Gamez-Montero P. J, Salazar E., Castilla R., Freire J., Khamashta M., Codina E. 2009, Misalignment effects on the load capacity of a hydraulic cylinder. *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 51, issue 2, pp. 105–113. http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2009.01.001
8. Yong X., Yang J., Shang J., Xie H. 2015, Design and optimization of a new kind of hydraulic cylinder for mobile robots. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, vol. 229(18), pp. 3459–3472. https://doi.org/10.1177%2F0954406215570106
9. Устройство для проведения спасательных работ / Юнгмейстер Д. А., Уразбахтин Р. Ю., Соколова Г. В.: пат. 2612165 Рос. Федерация; заявл. 26.04.16; опубл. 02.03.17, Бюл. № 7.
10. Yungmeyster D. A., Urazbakhtin R. Yu. 2017, Rescue complex for coal mines. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, vol. 87, issue 9, pp. 1–6. https://doi.org/10.1088/1755-1315/87/9/092032
11. Коршунов Г. И., Юнгмейстер Д. А., Лавренко С. А., Сабитов А. Э., Уразбахтин Р. Ю. Комплекс для спасательных работ на шахтах при завалах // Горное оборудование и электромеханика. 2015. № 3. С. 3–8.
12. Юнгмейстер Д. А., Агошков О. Г., Уразбахтин Р. Ю., Иванов А. В. Рациональная конструкция комплекса для спасательных работ на шахтах // Мир транспорта и технологических машин. 2015. № 2. С. 56–64.
13. Сабитов А. Э., Исаев А. И., Юнгмейстер Д. А., Уразбахтин Р. Ю. Рациональная конструкция комплекса для спасательных работ на шахтах. Обоснование компоновки параметров перфораторов-ударников для исполнительных органов проходческих комбайнов // Горное оборудование и электромеханика. 2016. № 4. С. 17–22.
14. Горное дело: энцикл. справочник. Т. 4. Проведение и крепление горных выработок / редколл. Н. М. Покровский (отв. ред.) и др. М.: Углетехиздат, 1958. 464 с.
15. Лагерев А.В., Лагерев И.А. Моделирование рабочих процессов в дроссельно-регулируемом гидроприводе манипуляционных систем мобильных машин при раздельном движении звеньев // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2018. № 4. С. 355–379.

Статья поступила в редакцию 07 мая 2019 г.

УДК 622.285.4: 624.191.6 https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-3-98-103

The results of theoretical and laboratory studies of the rescue complex for coal mines

Rustam Yusufovich URAZBAKHTIN*,
Dmitriy Alekseevich YUNGMEISTER**

Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia

Relevance of the work is due to the possibility of creating a rescue complex for conducting high-speed underground workings of small cross section (2.25 m2), the main task of which is the evacuation of miners met with an accident.
***Purpose of the work*:** substantiation of the power and structural parameters of the advancing ram of the rescue complex while drifting excavation working along rock masses of variable strength, roofs of various stability based on the determined dependences of the structural parameters of such a complex on the roof pressure to increase the speed of drifting by the complex evacuation workings of small section in difficult geological conditions**.**
Research methodology. A systematic approach was used, including analytical and computational methods with mathematical modelling, as well as the classical principles of theoretical mechanics.
Results and their application. Theoretically, the effort of advancing the rescue complex from the mass of its parts and the rock strength was determined; it is expressed in the steady state as a power-law dependence on the time and step of the movement, and the theoretical value of the coefficient of resistance to movement of the rescue complex is in the range 0.4–6, which is confirmed experimentally using laboratory stand**.**
Conclusions. The features of the work of the rescue complex at various rock thickness in the mine are considered, recommendations are suggested for choosing the power equipment of the complex.

Keywords: rescue complex, walking props, drifting rate, coefficient of resistance to movement, mine rescue operations.

REFERENCES

1. Pisarenko M. V. 2013, Prospects for the production and consumption of coal in the world, Russia and Kuzbass. *Ugol' Kuzbassa* [Kuzbass Coal], no. 5(031), pp. 8–12. (*In Russ.*)
2. 2018, Annual report on the activities of the Federal Service for Ecological, Technological and Atomic Supervision in 2017. Federal Service for Ecological, Technological and Atomic Supervision. Moscow, 420 p.
3. Pelikh S. G., Rodimov V. V., Boryazyak V. E., Shapovalov V. P. 2005, Analysis of engineering solutions for saving people at the Zapadnaya-Kapitalnaya mines, Rostovugol Company. *Gorny Informatsionno-Analiticheskiy Byulleten (nauchno-teknicheskii zhurnal*) [Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)], no. 2, pp. 191–193. (*In Russ.*)
4. Fedorin V. A., Shakhmatov V. Ya., Anferov B. A. 2013, Technological aspects of developing powerful low-angle coal beds in difficult mining and geological conditions of the Kuzbass. *Gorny Informatsionno-Analiticheskiy Byulleten (nauchno-teknicheskii zhurnal*) [Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)], no. 11, pp. 24–27. (*In Russ.*)
5. Fiscor S. 2010, Rescuers work to free chilean miners. *Engineering and Mining Journal*, vol. 211(8), pp. 24–26.
6. Kral S. 2010, Remarkable rescue unfolds. *Mining Engineering*, vol. 62(9), p. 96.
7. Gamez-Montero P. J, Salazar E., Castilla R., Freire J., Khamashta M., Codina E. 2009, Misalignment effects on the load capacity of a hydraulic cylinder. *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 51, issue 2, pp. 105–113. http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2009.01.001
8. Yong X., Yang J., Shang J., Xie H. 2015, Design and optimization of a new kind of hydraulic cylinder for mobile robots. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 229(18), pp. 3459–3472. https://doi.org/10.1177%2F0954406215570106
9. Yungmeyster D. A., Urazbakhtin R. Yu., Sokolova G. V. 2017, *Ustroystvo dlya provedeniya spasatel'nykh rabot* [Rescue device]. Patent RF no 2612165.
10. Yungmeyster D. A., Urazbakhtin R. Yu. 2017, Rescue complex for coal mines. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, vol. 87, issue 9, pp. 1–6. https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/87/9/092032
11. Korshunov G. I., Yungmeyster D. A., Lavrenko S. A., Sabitov A. E., Urazbakhtin R. Yu. 2015, Rescue complex for mines. *Gornoye oborudovaniye i elektromekhanika* [Mining equipment and electromechanics], no. 3, pp. 3–8. (*In Russ.*)
12. Yungmeyster D. A., Agoshkov O. G., Urazbakhtin R. Yu., Ivanov A. V. 2015, Rational design of the rescue complex for mines. *Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin* [World of transport and technological machines], no. 2, pp. 56–64. (*In Russ.*)
13. Sabitov A. E., Isaev A. I., Yungmeyster D. A., Urazbakhtin R. Yu. 2016, Rational design of the rescue complex for mines. Justification of the layout of the parameters of hammer drills for operating members of roadheaders. *Gornoye oborudovaniye i elektromekhanika* [Mining equipment and electromechanics], no. 4, pp. 17–22. (*In Russ.*)
14. 1958, Mining: reference book. Vol. 4. Carrying out mine workings and excavation support. Ed. by N. M. Pokrovsky. Moscow, 464 p.
15. Lagerev A. V., Lagerev I. A. 2018, Modeling of working processes in a throttle-regulated hydraulic drive of the handling systems of mobile machines with separate movement of links. *Nauchno-tekhnicheskiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta* [Scientific and Technical Journal of Bryansk State University], no. 4, pp. 355–379. (*In Russ.*)

The article was received on May 07, 2019

* ruraz@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-2913-5641
**iungmeister@yandex.com
https://orcid.org/0000-0001-7858-8340

УДК 621.873.2.3 https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-3-104-110

Определение напряженно-деформированного состояния силового гидроцилиндра в режиме динамического нагружения

Денис Александрович ПОТАХОВ*

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, Санкт-Петербург

Актуальность работы заключается в совершенствовании методов расчета силовых гидроцилиндров, необходимом для повышения надежности, оптимизации конструктивного исполнения элементов и эксплуатационных режимов работы гидроцилиндров дорожных, строительных и подъемно-транспортных машин. Наибольший же интерес представляют методы исследования динамических режимов работы гидроцилиндров.
Цель работы. Настоящая работа посвящена установлению закономерностей деформирования элементов силового гидроцилиндра во времени, находящегося в динамическом режиме нагружения. Исследования проводятся на примере одноступенчатого двустороннего действия гидроцилиндра вывешивания железнодорожного грузоподъемного крана «Сокол 80.01».
Методы исследования. Повышение точности расчетов динамического взаимодействия элементов гидроцилиндра обеспечивается за счет уменьшения числа допущений и использования численных методов, ориентированных на современные ЭВМ. Напряженно-деформированное состояние компонентов гидроцилиндра определяется методом конечных элементов в нелинейном динамическом анализе среды Simulation программы САПР SolidWorks путем моделирования заданных условий работы гидродвигателя. Температурный режим гидроцилиндра определяется в Flow Simulation SolidWorks (метод конечных объемов).
Результаты. Приведены результаты анализа численного исследования несущей способности силового гидроцилиндра, находящегося в динамическом режиме нагружения. В численной модели учтены: варианты контактирования сопряженных элементов гидроцилиндра в зависимости от конструктивных зазоров подвижных соединений, образованных в результате действия технологических и эксплуатационных факторов; сочетание продольных и поперечных динамических нагрузок; нелинейные характеристики напряжение–деформация материала; влияние температурного режима гидродвигателя. В рамках численного исследования гидроцилиндра определены параметры распределения напряжений и эквивалентных деформаций штока и гильзы цилиндра в функции времени. В работе также определены пространственная траектория места контакта с наибольшими контактными напряжениями сопряжения «втулка–зеркало гильзы» и «поршень–зеркало гильзы» гидроцилиндра и влияние температурного режима гидравлического агрегата на несущую способность гидроцилиндра.

Ключевые слова: гидроцилиндр, МКЭ, НДС, деформация, прочность, грузоподъемный кран, динамика.

Введение

Силовые гидроцилиндры всевозможных конструкций и типов широко применяются в различных отраслях машиностроения, в частности – в приводах исполнительных механизмов дорожных, строительных и подъемно-транспортных машин и оборудования (ДСПТМ).

Совокупность конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов, оказывающих воздействие на гидроцилиндры ДСПТМ, приводит к деформациям: штока, направляющей втулки, поршня, гильзы и уплотнительных узлов. В частности, типичными повреждениями (дефектами) гильз являются эллипсности и конусности, риски, вмятины, задиры, трещины; а штоков – износ поверхностей, коррозия, царапины, риски, задиры, искривление [1].

Следовательно, эксплуатационная надежность гидроцилиндров зависит не только от надежности уплотнительного узла [2, 3], но и от параметров несущей (нагрузочной) способности элементов гидродвигателя [1, 4].

Несущая способность силовых гидроцилиндров описывается напряженно-деформированным состоянием (НДС) его конструктивных элементов в различных режимах нагружения. Наибольший интерес представляют наиболее неблагоприятные условия работы гидроцилиндров, когда текущие эксплуатационные напряжения максимальны [4, 5]. Таким режимам нагружения соответствуют расчетные схемы с эксцентричными продольными сжимающими нагрузками и поперечными силами.

Помимо этого, конструктивные зазоры в подвижных соединениях «шток–направляющая букса» и «поршень–зеркало гидроцилиндра» приводят к перекосу продольных осей штока и цилиндра, который усиливается при эксцентричном и поперечном приложении нагрузки [5]. В зависимости от положения поршня в гильзе, от диаметров и зазоров элементов гидроцилиндра теоретически возможны три варианта контактирования [6]. Помимо этого, температурные воздействия также оказывают значительное влияние на эксплуатационные параметры гидроцилиндра. Основным источником нагрева гидравлического агрегата является работа сил трения в уплотнениях поршня и штока [7].

Проблеме надежности работы силового гидроцилиндра гидроприводов машин и механизмов в настоящее время посвящен ряд исследований, связанных с альтернативным конструктивным исполнением элементов; определением колебаний в зависимости от вида нагружения; обеспечением герметичности; влиянием конструктивных зазоров, креплений, перекосов сопряженных элементов, жесткости узлов, трения контактирующих элементов на критическую нагрузку, устойчивость, прочность и усталостный ресурс гидроцилиндра и его компонентов [8–12].

Вместе с тем вопросы, связанные с изучением температурных и динамических режимов работы силовых гидроцилиндров, в известных публикациях рассматриваются недостаточно полно.

В текущем исследовании рассматривается одноступенчатый двустороннего действия гидроцилиндр вывешивания железнодорожного грузоподъемного крана «Сокол 80.01». Предполагается, что гидроцилиндр – третьего варианта контактирования: зазор между поршнем и гильзой равен зазору между штоком и втулкой; одновременный контакт «поршень–зеркало гильзы» и «направляющая втулка–шток».

Совокупность внешних факторов и нагрузок, которые воздействуют на гидроцилиндр вывешивания в процессе эксплуатации, характеризуется недетерминированностью, т. е. отсутствием хорошо определенной явной функции от

* potakhovd@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-3734-6860

времени. Следовательно, результаты действий таких совокупностей внешних факторов и нагрузок также являются недетерминированными.

Статические нагрузки являются постоянными и неизменяемыми во времени. Поэтому статический анализ силового гидроцилиндра не может дать наиболее точного представления о реальной картине нагружения элементов гидроцилиндра.

Помимо этого, распределение полей напряжений и деформаций в конструкциях, как правило, неоднородно. Поэтому накопление повреждений протекает в различных точках неодинаково, следовательно, несущая способность элементов – это функция не только времени и сил, но и координат.

Таким образом, достаточно полная информация о характере нагружения элементов гидроцилиндра может быть получена с помощью решения деформационных задач в трехмерной постановке, учитывающих варианты контактирования сопряжений, материал компонентов, типы нагружения, инерционные силы, силы демпфирования, направление и величину силового фактора, скорость изменения действующей силы (сил).

Расчет изменения НДС гидроцилиндра в пространстве

Совокупность нагрузок, возникающих в процессе работы кранов на железнодорожном ходу, вследствие неравномерного внедрения опорных элементов в грунт, просадки выносных опор, трансформации ядра опирания опорного контура, инерционных нагрузок приводит к смещению оголовка штока опорного гидроцилиндра, что в свою очередь приводит к появлению значительного изгибающего момента силы, приложенной к оголовку штока. В результате этого возникают изломы, остаточные изгибные деформации штоков, местная пластическая деформация стенок гильз.

Наиболее полное представление о НДС силовых гидроцилиндров могут дать исследования, в которых применяются динамические математические модели в сочетании с численными методами, ориентированными на современные ЭВМ [13]. Наибольшее распространение по решению задач о НДС элементов конструкции получил метод конечных элементов (МКЭ), который универсален по отношению к геометрии исследуемой области и реологии деформирования материала [13].

В стреловых поворотных кранах распределение нагрузки на опоры имеет переменный характер – в процессе вращения поворотной платформы происходит циклический процесс трансформации опорного контура, т. е. процесс последовательного нагружения и разгружения опор крана [14]. Опора, расположенная ближе к переносимому грузу, нагружается сильнее, дальше – слабее; в отдельных случаях наблюдается отрыв наименее нагруженной опоры от рабочей поверхности – в этом случае имеет место трехопорная схема опирания.

С целью определения НДС опорных гидроцилиндров грузоподъемной машины в качестве функции времени в динамическом режиме нагружения проводится нелинейное динамическое исследование аутригера в среде Simulation программы САПР SolidWorks. Нелинейный динамический анализ позволяет учесть не только динамику нагружения, а также нелинейные характеристики напряжение–деформация материала и большие деформации элементов конструкции [15, 16]. В нелинейном динамическом анализе используется инкрементный метод «управления нагрузкой», а в качестве итерационной схемы – алгоритм Ньютона–Рафсона (NR) [15].

В данной среде выносная опора крана нагружаются силовыми факторами, представляющими собой временные зависимости реакций выносных опор по трем координатным осям X ($Fx = f(t)$), Y ($Fy = f(t)$), Z ($Fz = f(t)$); особенностью данных временных зависимостей является то, что они получены с учетом податливости грунтового основания, жесткости элементов грузоподъемного крана и инерционных нагрузок (подробнее – в работе [17]). Таким образом, гидроцилиндр вывешивания в процессе эксплуатации непрерывно находится под действием нелинейных сил, изменяющихся по модулю, направлению и скорости приложения.

В результате проведенных расчетов определено временное НДС конструктивных элементов аутригера железнодорожного грузоподъемного крана в процессе динамического нагружения.

В качестве примера в таблице и на рис. 1 представлено временное изменение НДС сопряжения «направляющая втулка–зеркало гильзы» произвольного сечения гидроцилиндра. На рис. 1 представлено сравнение временных изменений НДС противоположных точек T_1 и T_2 зеркала гильзы гидроцилиндра.

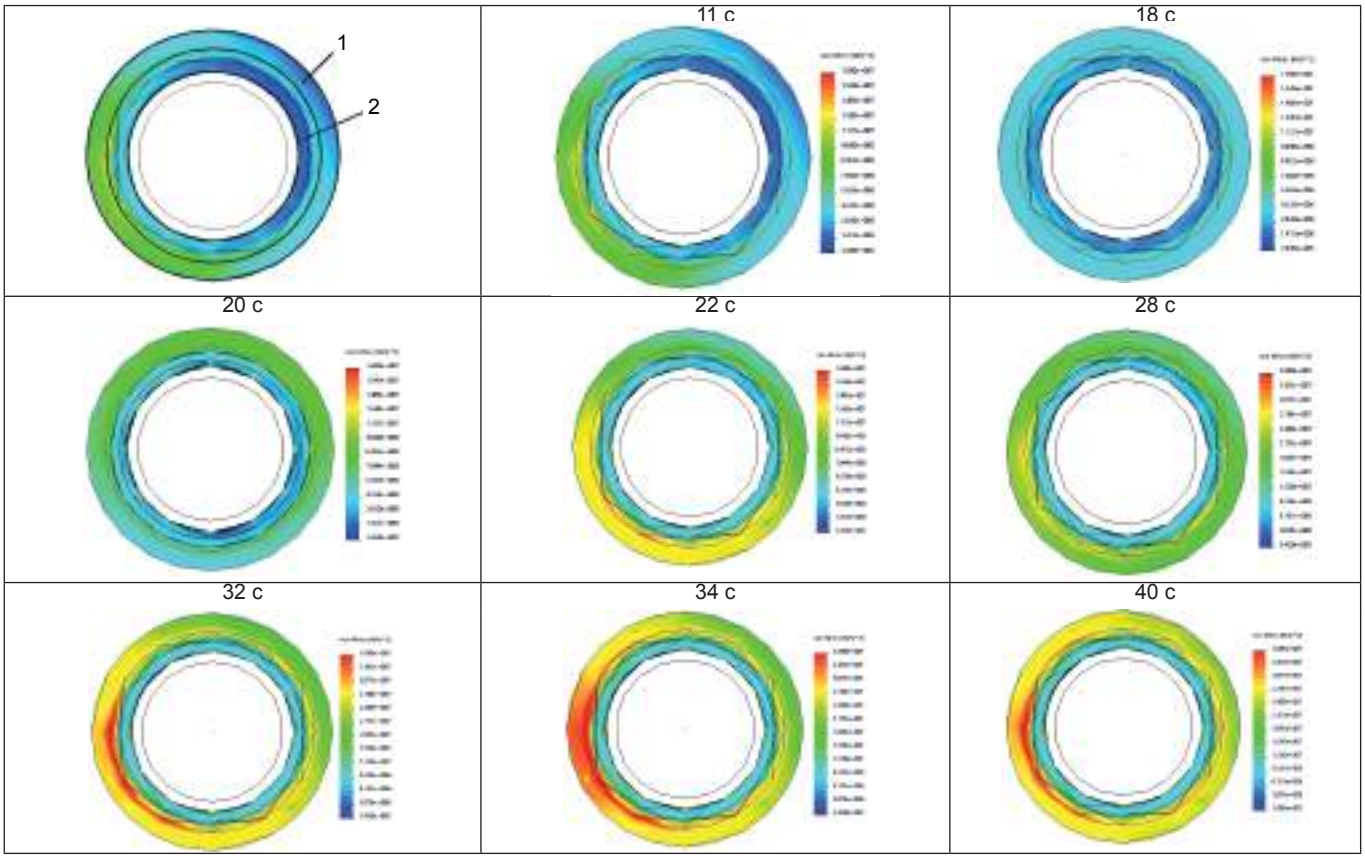
Анализ изменения напряженного состояния конструктивных элементов гидроцилиндра во времени (таблица, рис. 1) показывает, что максимальное нагружение гильзы гидроцилиндра для произвольного момента времени происходит в разных точках сопряжения «втулка–зеркало гильзы» в процессе вращения платформы; т. е.точка контакта с наибольшими контактными напряжениями сопряжения «втулка–зеркало гильзы» изменяет свое положение в зависимости от совокупности факторов, действующих в конкретный момент времени. Помимо этого, интервал времени 18–21,5 с, в котором $\sigma_2 > \sigma_1$ (рис. 1), текущего расчета соответствует моменту смены опорного контура грузоподъемного крана.

На основе результатов проведенных расчетов строится поверхность деформаций (в качестве примера – по оси X) оси штока гидроцилиндра во времени (рис. 2), анализ которой показывает, что в результате действия поперечного (горизонтальные силы $F_г = f(t)$) и продольного (вертикальные силы $F_в = f(t)$) совокупного нагружения происходит неравномерное искривление штока гидроцилиндра во времени. С целью лучшего восприятия: на оси штока обозначены точки с номерами 1–15, которые также обозначены на одной оси построенной поверхности; на рис. 2 приведена одна и та же трехмерная поверхность, но с разных ракурсов.

Стоит отметить, что искривление штока гидроцилиндра в результате динамического нагружения имеет специфический вид: в промежутке времени примерно до 17 секунды наиболее деформируется центральная часть штока; при этом в момент времени примерно13,5 секунд оголовок штока по оси X практически не деформируется, а начиная примерно с 17 секунды наибольшее перемещение имеет оголовок.

По аналогии с представленными результатами (таблица, рис. 1) можно отобразить (в сечении и в пространстве) изменение НДС во времени любого выбранного узла (точки) или совокупности узлов (точек) элементов гидроцилиндра вывешивания грузоподъемного крана в динамическом режиме нагружения.

Изменение НДС во времени сопряжения «направляющая втулка–зеркало гильзы».
Change in strain-stress state in the course of "liner– cylinder tube wall" coupling.



Шток, поршень и другие элементы скрыты или прозрачны; 1 – гильза гидроцилиндра, 2 – направляющая втулка.
The rod, piston and other elements are hidden or transparent; 1 – cylinder tube, 2 – guide liner.

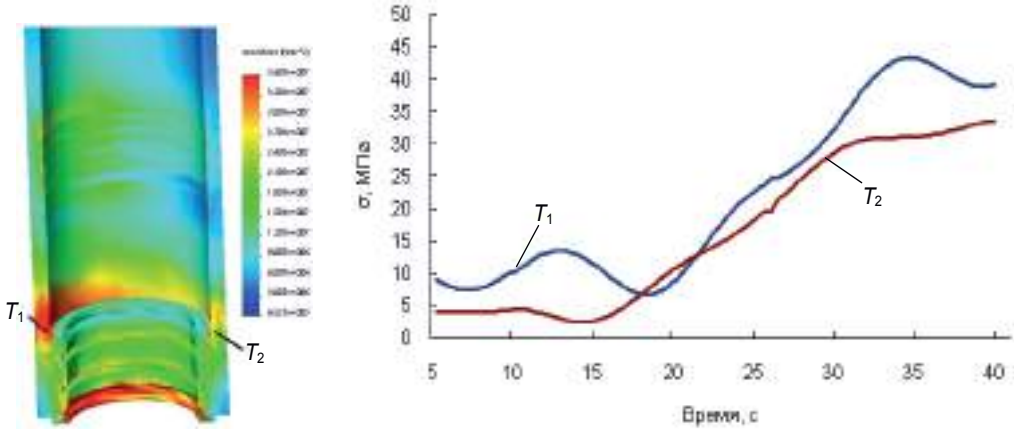


Рисунок 1. Сравнение временных зависимостей НДС точек T_1 и T_2 зеркала гильзы гидроцилиндра. В областях эпюры, отмеченных красным цветом, напряжения ≥ 36,01 МПа.
Figure 1. Comparison of time characteristic of the strain-stress state points T1 and T2 of the cylinder tube. In the areas of the diagram marked in red, the stress is ≥ 36.01 MPa.

По результатам динамического расчета построены поверхности напряжений и эквивалентной деформации гильзы гидроцилиндра вывешивания в месте контакта с направляющей втулкой в зависимости от сочетаний вертикальных $F_в$ и горизонтальных $F_г$ нагрузок (рис. 3).

В результате расчета были определены пространственные траектории и места контакта с наибольшими контактными напряжениями сопряжения «втулка–зеркало гильзы», которое упрощенно представлено в виде точки (рис. 4, а), и перемещения оголовка штока гидроцилиндра под действием динамических нагрузок (рис. 4, б).

Аналогичные результаты расчета контактного взаимодействия сопряжения «втулка–зеркало гильзы» получены и для сопряжения «поршень–зеркало гильзы цилиндра».

Зазоры сопряженных элементов гидроцилиндра, а также действие горизонтальных нагрузок на оголовок гидроцилиндра вывешивания грузоподъемного крана вследствие неравномерного внедрения опорных элементов в грунт, трансформации ядра опирания опорного контура и инерционных нагрузок приводят к увеличению реакций в подвижных

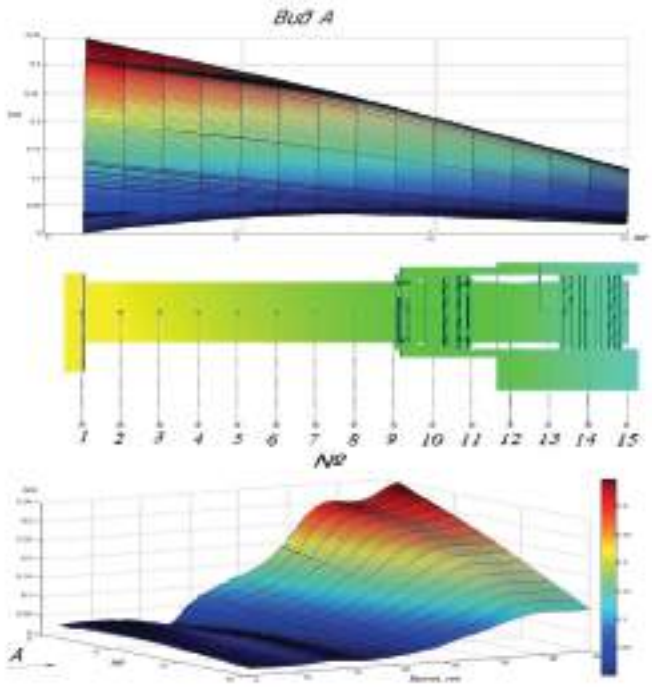


Рисунок 2. Поверхность деформаций штока гидроцилиндра вывешивания.
Figure 2. The surface of deformation of the jacking hydraulic-cylinder rod.

сопряжениях «втулка–зеркало гильзы» и «поршень–зеркало гильзы», которые являются причиной возникновения концентраций напряжений и деформаций. Это в свою очередь ведет к повышенному адгезионному износу и увеличению деформаций элементов сопряжений гидроцилиндра; вместе с тем повышается вероятность искривления и заклинивания штока в цилиндре.

Расчет НДС гидроцилиндра с учетом температурного режима гидравлического агрегата

Повышенный износ контактного взаимодействия деформируемых тел компонентов гидроцилиндра приводит к нагреву гидравлического агрегата. Как известно, с повышением температуры механические свойства конструкционных материалов изменяются, например, их пластичность, как правило, увеличивается [18]. При воздействии изменения температуры на тела, ограниченные в возможности свободно деформироваться (сжиматься или расширяться), а также в случае разницы температуры в различных точках конструкции и при разных свойствах материала деталей возникают температурные напряжения [18]. Следовательно, изменения температуры могут повлечь за собой значительные изменения полей деформации и напряжений в конструкции.

Рассматривается выносная опора железнодорожного крана «Сокол 80.01» с гидроцилиндром вывешивания первого варианта контактирования сопряженных элементов (контакт «поршень–зеркало гильзы»).

С целью определения теплового режима работы гидроцилиндра вывешивания проводится расчет в функционале Flow Simulation SolidWorks, движение и теплообмен текучей среды в котором моделируется при помощи уравнений Навье–Стокса, описывающих в нестационарной постановке законы сохранения массы, импульса и энергии этой среды [15, 19]. В Flow Simulation в качестве численного метода используется метод конечных объемов (МКО).

На первом этапе назначаются общие настройки модели: тип и параметры анализа, текучие среды, материал элементов аутригера, условия на стенках, начальные и граничные условия. Применяются следующие текучие среды: всесезонное гидравлическое загущенное масло (ВМГЗ) для внутренних полостей гидроцилиндра; воздух – для окружающей среды. Так как ВМГЗ отсутствует в базе данных программы SolidWorks, то создается «материал пользователя», настроенный согласно основным характеристикам применяемого гидравлического масла [20]. Граничнымии начальными условиями являются: давление и температура поршневой $P_п$, $T_п$, штоковой $P_ш$, $T_ш$ полостей и окружающей среды $P_{о.с}$, $T_{о.с}$, температура конструкции $T_к$.

Далее назначаются цели проекта исследования, параметры сетки, проводится серия расчетов, в которых $T_к = T_{о.с} =$ 293,2 К, а $T_п = T_ш =$ 293,2…413,2 К. Результаты теплового расчета гидроцилиндра представлены на рис. 5, а. Анализ полученных данных (рис. 5, а) показал, что в случае $\Delta T = T_п - T_{о.с} > 0$ наблюдается неравномерный нагрев элементов аутригера.

С целью определения влияния температурного режима на несущую способность гидроцилиндра результаты термического исследования из Flow Simulation SolidWorks включаются в активное нелинейное динамическое исследование анализа несущей способности аутригера в Simulation SolidWorks (рис. 5, б). Таким образом, в расчетной модели Simulation учитываются тепловые эффекты и эффект давления жидкости из Flow Simulation. В этом случае значения температуры граней твердых тел Flow Simulation сопоставляются с конечно-элементной сеткой твердотельной геометрии выносной опоры Simulation.

Таким образом, значительный неравномерный нагрев гидравлического агрегата в процессе нагружения оказывает существенное влияние на деформацию элементов гидроцилиндра. Так, при $\Delta T = 100$ напряжения гильзы цилиндра в месте контакта с поршнем увеличиваются на ≈ 25 %.

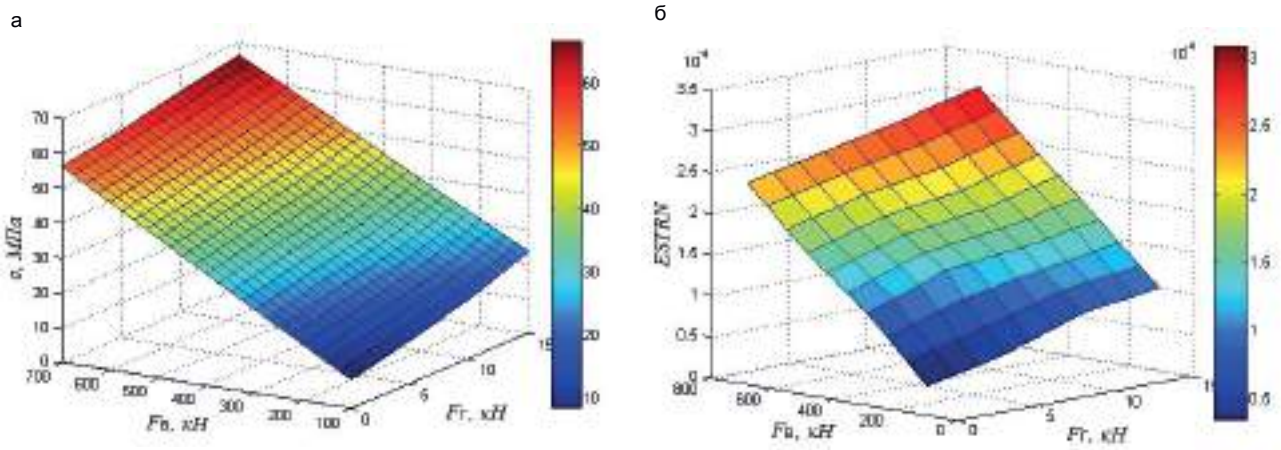


Рисунок 3. Поверхности напряжений (а) и эквивалентной деформации (б) гильзы гидроцилиндра вывешивания в месте контакта с направляющей втулкой.
Figure 3. The surface of the stresses (a) and equivalent deformation (б) of the cylinder tube of jacking at the point of contact with the guide liner.

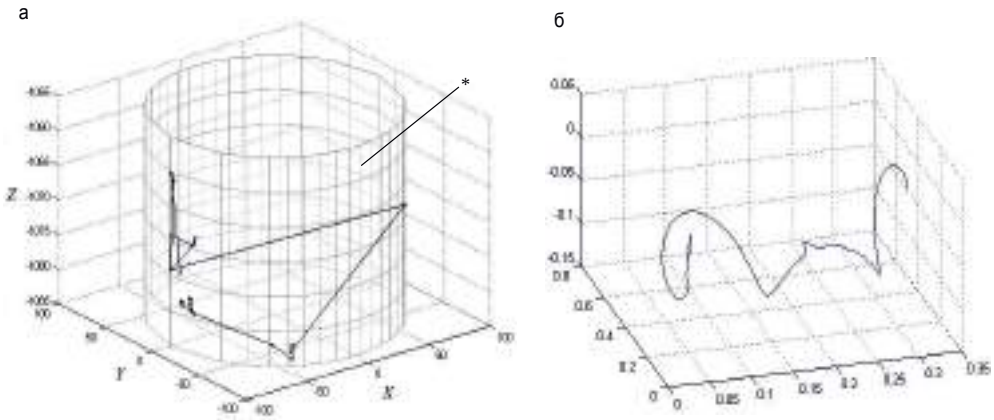


Рисунок 4. Перемещение точки контакта «втулка–зеркало гильзы» (а) и оголовка штока гидроцилиндра вывешивания (б) в пространстве; * – условное обозначение поверхности гильзы цилиндра.
Figure 4. Moving the "liner – cylinder tube wall" contact point (a) and the rod head of the jacking hydraulic cylinder (b) in space; * - symbol of the surface of the cylinder tube.

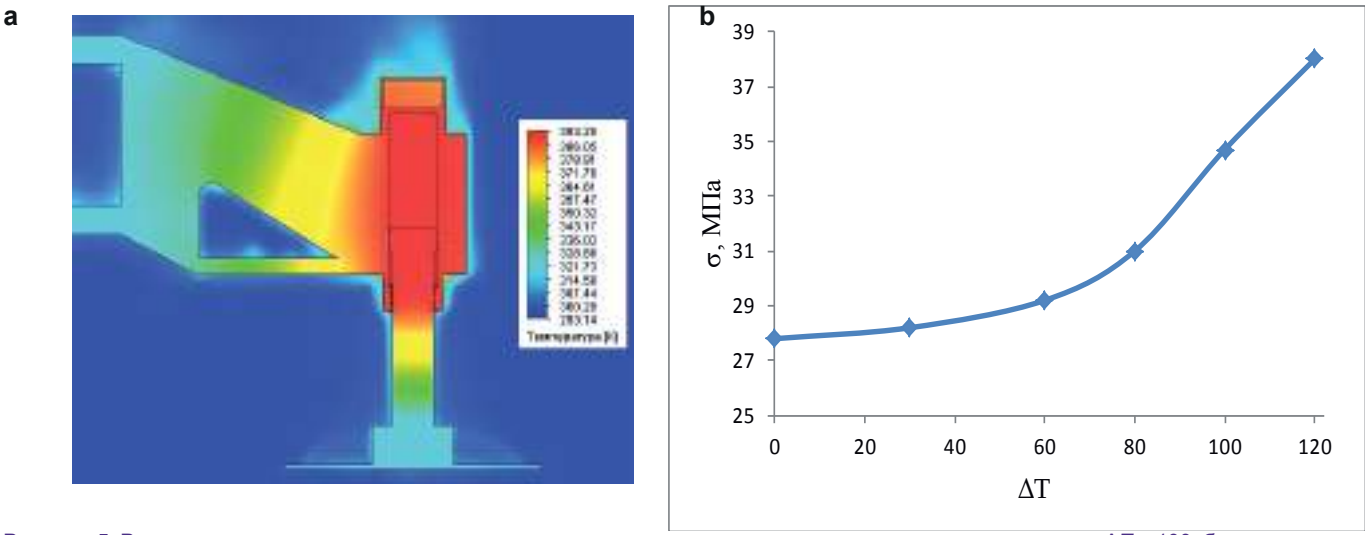


Рисунок 5. Результаты теплового расчета гидроцилиндра. а – распределение температуры аутригера при Δ*T* = 100; б – зависимость напряжений гильзы гидроцилиндра вывешивания в месте контакта с поршнем от разницы температур Δ*T*.
Figure 5. The results of thermal calculation of the hydraulic cylinder. a – is the temperature distribution of the jack pad at ΔT = 100; b – the dependence of the stresses of the cylinder tube of jacking in the place of contact with the piston on the temperature difference ΔT.

Выводы

В результате анализа взаимодействия сопряженных элементов силового гидроцилиндра вывешивания грузоподъемного крана в динамическом режиме нагружения:

– установлена качественная картина изменения НДС гидроцилиндра во времени;

– установлено неравномерное деформирование штока гидроцилиндра в пространстве;

– определена пространственная траектория места контакта с наибольшими контактными напряжениями сопряжения «втулка–зеркало гильзы» и «поршень–зеркало гильзы»;

– установлено, что в момент трансформации опорного контура грузоподъемного крана происходит характерное изменение интенсивности и точки максимального контакта сопряженных элементов силового гидроцилиндра вывешивания;

– определено влияния температурного режима гидравлического агрегата на несущую способность гидроцилиндра.

Таким образом, в процессе эксплуатации гидроцилиндр вывешивания грузоподъемного крана находится в сложном напряженно-деформированном состоянии, обусловленном действием совокупности нелинейных вертикальных и горизонтальных нагрузок и взаимодействием сопряженных элементов гидроцилиндра в зависимости от конструктивных зазоров подвижных соединений; в связи с этим возникают неравномерные деформации штока и гильзы гидроцилиндра во времени и координатах.

Использование динамической математической модели позволило получить приведенные результаты; благодаря этому приведенные расчеты принципиально отличаются от ряда других исследований, в которых определение НДС гидроцилиндра определяется под действием статически приложенной нагрузки.

Аналогичные исследования можно провести для всех типов силовых гидроцилиндров дорожных, строительных и подъемно-транспортных машин и оборудования, результаты которых могут быть использованы в мероприятиях по повышению надежности работы гидроцилиндров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кобзов Д. Ю., Усова С. В., Фурзанов С. Ю. О диагностическом параметре несущей способности гидроцилиндров машин // Системы. Методы. Технологии. 2009. № 2 . С 29–32.
2. Кузнецов В. В. Ресурс подвижных уплотнительных соединений с кольцами круглого сечения // Вестник Мордовского университета. 2018. Т. 28, № 4. С. 562–582.
3. Flitney R. Seals and sealing handbook. 6th edition. Oxford: Butterworth–Heinemann, 2014. 648 p.
4. Марутов В. А., Павловский С. А. Гидроцилиндры. Конструкция и расчет. М.: Машиностроение, 1973. 171 с.
5. Ковалевский В. Ф., Железняков Н. Т., Бейлин Ю. Е. Справочник по гидроприводам горных машин. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Недра, 1973. 504 с.
6. Потахов Д. А., Ватулин Я. С. Численный расчет утечек рабочей жидкости через радиальный зазор сопряженных элементов гидроцилиндра вывешивания грузоподъемного крана // Вестник СибАДИ. 2019. Т. 16, № 1 (65). С. 18–30.
7. Макаров Г. В. Уплотнительные устройства. Изд. 2-е, перераб. и доп. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1973. 232 с.
8. Gamez-Montero P. J., Salazar E., Castilla R., Freire J., Khamashta M., Codina E. Misalignment effects on the load capacity of a hydraulic cylinder // International Journal of Mechanical Sciences. 2009. Vol. 51, issue 2. P. 105–113. http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2009.01.001
9. Tomski L., Uzny S. A hydraulic cylinder subjected to Euler's load in aspect of the stability and free vibrations taking into account discrete elastic elements // Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2011. Vol. 11 (3). P. 769–785. https://doi.org/10.1016/S1644-9665(12)60115-0
10. Gamez-Montero P. J., Salazar E., Castilla R. et al. Friction effects on the load capacity of a column and a hydraulic cylinder // International Journal of Mechanical Sciences. 2009. Vol. 51 (2). P. 145–151.
11. Narvydas E. Buckling strength of hydraulic cylinders – an engineering approach and finite element analysis // Mechanika. 2016. Vol. 22 (6). P. 474–477.
12. Baragetti S., Villa F. Effects of Geometrical Clearances, Supports Friction, and Wear Rings on Hydraulic Actuators Bending Behavior // Mathematical Problems in Engineering. 2016. Vol. 16. P. 1–17. http://dx.doi.org/10.1155/2016/3781397
13. Карзов Г. П., Марголин Б. З., Швецова В. А. Физико-механическое моделирование процессов разрушения. СПб.: Политехника, 1993. 391 с.
14. Браунде В. И., Гохберг М. М., Звянягин И. Е. и др. Справочник по кранам. В 2 т. Под общ. ред. М. М. Гохберга. Л.: Машиностроение, 1988. Т. 1. 536 с.
15. Kurowski P. Engineering Analysis with SOLIDWORKS Simulation 2017, SDC Publications, 2017. 600 p.
16. Алямовский А. А., Собачкин А. А., Одинцов Е. В., Харитонович А. И., Пономарев Н. Б. SolidWorks 2007/2008. Компьютерное моделирование в инженерной практике. СПб.: БХВ-Петербург, 2008. 1040 с.
17. Ватулин Я. С., Потахов Д. А. Моделирование взаимодействия элементов опорного контура железнодорожного грузоподъемного крана с грунтовой опорной поверхностью // Изв. ПГУПС. 2019. Т. 16, № 1 (58). С. 59–67.
18. Биргер И. А., Шорр Б. Ф., Иосилевич Г. Б. Расчет на прочность деталей машин: справочник. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1993. 640 с.
19. Алямовский А. А. SolidWorks Simulation. Инженерный анализ для профессионалов: задачи, методы, рекомендации. М.: ДМК Пресс, 2015. 562 с.
20. Васильченко В. А. Гидравлическое оборудование мобильных машин: справочник. М.: Машиностроение, 1983. 301 с.

Статья поступила в редакцию 18 апреля 2019 г.

УДК 621.873.2.3 https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-3-104-110

Determination of the strain-stress state of a power hydraulic cylinder in nonstationary loading mode

Denis Aleksandrovich POTAKHOV*

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Saint Petersburg, Russia

Relevance of the work is to improve the methods for calculating power hydraulic cylinders, necessary to increase reliability, optimize the structural design of elements and operational modes of operation of hydraulic cylinders of road, construction and carrying and lifting machines. The methods for studying the nonstationary loading modes of hydraulic cylinders are of the utmost interest.
Purpose. This work is devoted to determination the patterns of deformation of the elements of a power hydraulic cylinder being in a nonstationary loading mode. Research is conducted using a single-stage double-acting hydraulic cylinder of the jacking rail crane "Sokol 80.01" as an example.
Research methods. Improving the accuracy of calculations of the dynamic interaction of hydraulic cylinder elements is ensured by reducing the number of assumptions and using numerical methods oriented to modern computers. The strain-stress state of the components of the hydraulic cylinder is determined by the finite element method in a nonlinear dynamic analysis of the Simulation medium of the SolidWorks CAD program by modelling the specified operating conditions of the hydraulic motor. The temperature regime of the hydraulic cylinder is defined in Flow Simulation SolidWorks (finite volume method).
Results. The results of an analysis of a numerical study of the bearing capacity of a power hydraulic cylinder in a dynamic loading mode are presented. The numerical model takes into account: contacting options for the mating elements of the hydraulic cylinder, depending on the structural clearances of the movable joints formed as a result of technological and operational factors; a combination of longitudinal and transverse dynamic loads; nonlinear stress – strain characteristics of the material; the influence of the temperature regime of the hydraulic motor. As part of a numerical study of the hydraulic cylinder, the parameters of the distribution of stresses and equivalent deformations of the rod and cylinder liner as a function of time are determined. The authors also determined the spatial trajectory of the contact point with the highest contact voltage of the "liner – cylinder tube wall" and "piston – cylinder tube wall" coupling and the influence of the temperature regime of the hydraulic unit on the bearing capacity of the hydraulic cylinder.

Keywords: hydraulic cylinder, FEM, strain-stress state, deformation, strength, crane, dynamics.

REFERENCES

1. Kobzov D. Yu., Usova S.V., Furzanov S. Yu. 2009, On the diagnostic parameter of the bearing capacity of hydraulic cylinders of machines. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies], no. 2, pp. 29–32. (*In Russ.*)
2. Kuznetsov V. V. 2018, Resource of moving sealing joints with O-rings. *Vestnik Mordovskogo universiteta* [Engineering Technologies and Systems], vol. 28, no. 4, pp. 562–582. (*In Russ.*)
3. Flitney R. 2014, Seals and sealing handbook. 6th edition. Oxford: Butterworth–Heinemann, 648 p.
4. Marutov V. A., Pavlovskiy S. A. 1973, *Gidrotsilindry. Konstruktsiya i raschet* [Hydraulic cylinders. Design and calculation], 171 p.
5. Kovalevsky V. F., Zheleznyakov N. T., Beilin Yu. E. 1973, *Spravochnik po gidroprivodam gornykh mashin* [Handbook of hydraulic drives of mining machines]. Revised and corrected edition. Moscow, 504 p.
6. Potakhov D. A., Vatulin Ya. S. 2019, Numerical calculation of leaks of the working fluid through the radial clearance of the mating elements of the hydraulic cylinder for hanging a crane. *Vestnik SibADI* [The Russian Automobile and Highway Industry Journal], vol. 16, no. 1 (65), pp. 18–30. (*In Russ.*)
7. Makarov G. V. 1973, *Uplotnitel'nyye ustroystva* [Seal assemblies], Revised and corrected edition. 232 p.
8. Gamez-Montero P. J., Salazar E., Castilla R., Freire J., Khamashta M., Codina E. 2009, Misalignment effects on the load capacity of a hydraulic cylinder. *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 51, issue 2/ pp. 105–113. http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2009.01.001
9. Tomski L., Uzny S. 2011, A hydraulic cylinder subjected to Euler's load in aspect of the stability and free vibrations taking into account discrete elastic elements. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, vol. 11 (3), pp. 769–785. https://doi.org/10.1016/S1644-9665(12)60115-0
10. Gamez-Montero P. J., Salazar E., Castilla R. et al. 2009, Friction effects on the load capacity of a column and a hydraulic cylinder. *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 51 (2), pp. 145–151.
11. Narvydas E. 2016, Buckling strength of hydraulic cylinders – an engineering approach and finite element analysis. *Mechanika*, vol. 22 (6), pp. 474–477.
12. Baragetti S., Villa F. 2016, Effects of Geometrical Clearances, Supports Friction, and Wear Rings on Hydraulic Actuators Bending Behavior. *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 16, pp. 1–17. http://dx.doi.org/10.1155/2016/3781397
13. Karzov G. P., Margolin B. 3., Shvetsova V. A. 1993, *Fiziko-mekhanicheskoye modelirovaniye protsessov razrusheniya* [Physical and mechanical modeling of fracture processes]. Saint-Petersburg, 391 p.
14. Braunde V. I., Gokhberg M. M., Zvyanyagin I. E. et al. 1988, Handbook of cranes. In 2 vol. Ed. By M. M. Gokhberg, vol. 1, 536 p.
15. Kurowski P. 2017, Engineering Analysis with SOLIDWORKS Simulation 2017, SDC Publications, 600 p.
16. Alyamovsky A. A., Sobachkin A. A., Odintsov E. V., Kharitonovich A. I., Ponomarev N. B. 2008, SolidWorks 2007/2008. *Komp'yuternoye modelirovaniye v inzhenernoy praktike* [Computer modeling in engineering practice]. Saint-Petersburg, 1040 p.
17. Vatulin Ya. S., Potakhov D. A. 2019, Modeling the interaction of the elements of the supporting contour of a railway crane with a ground support surface. *Izvestiya PGUPS* [Proceedings of Petersburg Transport University], vol. 16, no. 1 (58), pp. 59–67. (*In Russ.*)
18. Birger I. A., Shorr B. F., Iosilevich G. B. 1993, *Raschet na prochnost' detaley mashin* [Strength calculation of machine parts: a reference], 640 p.
19. Alyamovsky A. A. 2015, *Inzhenernyy analiz dlya professionalov: zadachi, metody, rekomendatsii* [SolidWorks Simulation. Engineering analysis for professionals: tasks, methods, recommendations]. Moscow, 562 p.
20. Vasilchenko V. A. 1983, *Gidravlicheskoye oborudovaniye mobil'nykh mashin: spravochnik* [Hydraulic equipment of mobile machines: a reference]. Moscow, 301 p.

The article was received on April 18, 2019

* ✉ potakhovd@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-3734-6860

УДК 539.(4+4.011+42)+622.(011.4+02+023.23) https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-3-111-123

Континуальная концепция сдвиговой дезинтеграции твердых тел

Андрей Викторович ЖАБКО*

Уральский государственный горный университет, Россия, Екатеринбург

Актуальность темы исследований. Вопросы прочности материалов являются основополагающими в любой технической науке. Особенную актуальность вопросы разрушения имеют в горном деле, где основные технологические процессы направлены на разрушение горных пород (бурение, взрывание, дробление и т.д.), а технология добычи (системы разработки) или ведения горных работ выбирается из условия устойчивости (прочности) горного массива.

Цель работы. Работа посвящена установлению закономерностей пластического деформирования и дезинтеграции горных пород (твердых тел) на основе их представления сплошной (континуальной) средой.

Методы исследований, результаты и выводы. Автором предлагаются некоторые новые закономерности пластического деформирования, полученные аналитически на основе континуальной механики разрушения, среди которых функции поверхности текучести и пластического потенциала, критерий прочности твердых тел, уравнение, определяющее собственный момент блоков (образовавшихся структур) при пластическом деформировании, динамические уравнения (эволюционные) поведения фрагментированных сред, вариационный принцип дезинтеграции твердых тел, критерий роста или появления трещины на любом масштабном (иерархическом) уровне, тесно связанный с фундаментальным параметром иерархии горных массивов и числом Фидия. Выявлены, объясняются и обсуждаются некоторые эффекты и явления протекания процессов, происходящих во время пластического деформирования, дезинтеграции (деструкции). В частности, показано, в том числе экспериментально, что главным признаком пластической деформации на стадии упрочнения является частичная или полная (на пределе упругости) потеря удерживающего эффекта от внутреннего трения на площадках микросдвигов под действием минимального главного напряжения и его постепенное усиление в процессе упрочнения, что является следствием явления дилатансии, т. е. увеличения объема в направлении минимального главного напряжения. Показано, что с континуальных позиций разворот сдвиговых площадок (структурных элементов) – это неизбежность, откладывающая момент разрушения, при отсутствии ротационной деформации будет происходить одномоментный срез образца. Именно этим объясняется близость пределов упругости и прочности для хрупких материалов. То есть намечен критерий разделения материалов на хрупкие и пластичные. Указывается на возможный механизм явления перехода от накопления объемных повреждений в процессе пластического деформирования к росту магистральной трещины (замирание деформационной активности) и соответствующее падение напряжений, которые могут быть объяснены с той позиции, что в момент прорастания (собственно разрушения) микротрещины сориентированы под одним углом, дальнейшее изменение их ориентировки (разворот) невозможно (рост упругого сопротивления) и в силу концентраций напряжений происходит их соединение по принципу анизотропной среды.

Ключевые слова: функция пластического потенциала, критерий пластичности и прочности, дилатансия, параметр иерархии, вариационный принцип, момент блоков, уравнение sin-Гордона.

Введение

Данная статья является продолжением и обобщением работ по вопросу исследования закономерностей дезинтеграции, пластического деформирования, разрушения горных пород (твердых тел) на основе представления твердого тела сплошной (континуальной) средой. Работа является попыткой объяснить некоторые эффекты и явления, не получившие окончательного обоснования, с континуальных позиций. В частности, кластеризацию энергии (мозаичность напряженно-деформированного состояния), механизм дилатансии и связанное с ним отсутствие критерия пластичности и прочности, иерархическое строение горных массивов, собственный момент (спин) при пластическом деформировании и разворот блоков дискретных сред при разрушении (потери устойчивости) и т. д.

Особо хочется отметить, что приведенные результаты являются сугубо аналитическими, единственным модельным допущением является континуальность среды. При этом полученные результаты сопоставляются с результатами экспериментальных данных.

В практике горного дела, а также других технических направлениях возникает задача по оценке устойчивости откосов сооружений (борта карьеров и откосы отвалов, железнодорожные и автодорожные насыпи, ограждающие гидротехнические сооружения и т. д.). Рассматривая откос горных пород как сплошную среду, автор разработал теорию их расчета для различных горно-геологических условий [1]. Полученный в ходе исследований механико-математический аппарат послужил фундаментальной основой для установления закономерностей дезинтеграции, пластического деформирования и разрушения твердых тел как сплошной среды.

Единый аналитический критерий сдвиговой пластичности и прочности твердых тел и горных пород

Итак, без достаточно обширных выводов, с которыми читатель может ознакомиться в работах [1–3], в рамках модели сплошной среды, обладающей внутренним трением φ и сцеплением *C*, аналитически получен, экспериментально проверен и подтвержден [4] единый критерий пластичности (на стадии упрочнения) и прочности горных пород (твердых тел) при сдвиге:

– в компонентах главных напряжений σ_1, σ_3:

$$\sigma_3 = \sigma_1 - 2C\sqrt{\left(1+\frac{\operatorname{tg}\varphi\,\sigma_1}{C}\right)\left(1+\frac{\operatorname{tg}\varphi\,k\,\sigma_3}{C}\right)}; \tag{1}$$

$$\tau = C\left(1+\sin\varphi\right)+\frac{1+k}{1-k}C\sin\varphi\ln\left|\frac{\left(1-k\right)\sigma_n+2\,k\,C\cos\varphi}{\left(1+k\right)C\cos\varphi}\right|, \tag{2}$$

* ✉ zhabkoav@mail.ru
http://orcid.org/0000-0002-3081-9522

определяющий:

при $k = 0$ – функцию пластического потенциала и начальную поверхность текучести (предел упругости) для горных пород с пластическим характером разрушения;

при $0 \leq k \leq 1$ – предел прочности горных пород и предел упругости для горных пород с хрупким характером разрушения ($k \approx 1 - \sin\varphi$);

при $k \to 1$ – теоретическую предельную поверхность или предел прочности при сдвиге (срезе), совпадающую с критерием Кулона (Coulomb, 1773).

И действительно, используя выражение (2), получим:

$$\lim_{k\to 1}\tau = \left[\frac{0}{0}\right] = C + \operatorname{tg}\varphi\,\sigma_n.$$

Предельные поверхности критериев (1), (2) представлены на рис. 1, 2.

Критерий (1) может быть преобразован также к виду:

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = C + \operatorname{tg}\varphi\,\sigma_\tau, \tag{3}$$

где σ_τ – нормальное напряжение (абсцисса), соответствующее среднему геометрическому значению от касательных напряжений в точках с абсциссами $k\sigma_3$ и σ_1.

А если перейти к приведенным напряжениям: $\sigma'_j = \sigma_j + C\operatorname{ctg}\varphi$, то критерий (1) примет следующий простой вид:

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} = \tau_{\max} = \operatorname{tg}\varphi\sqrt{(k\sigma_3)'\cdot\sigma'_1} = \operatorname{tg}\varphi\cdot\sigma' \tag{4}$$

где σ' – среднее геометрическое значение приведенных напряжений.

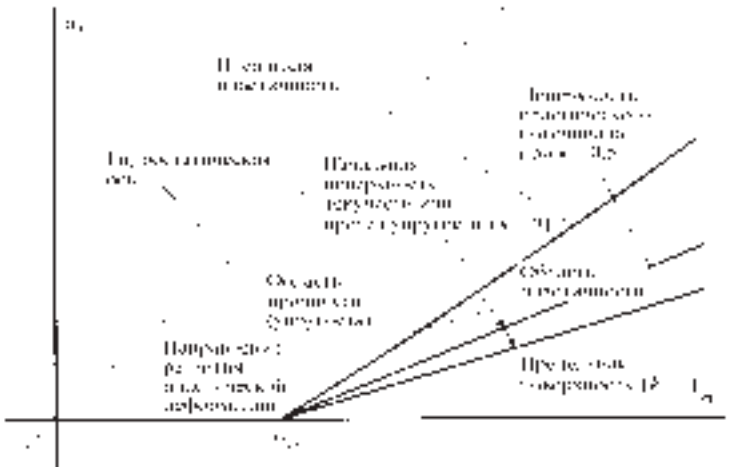


Рисунок 1. Поверхности пластического деформирования в координатной плоскости компонент главных напряжений.
Figure 1. Plastic deformation surfaces in the coordinate plane of the primary stress components.

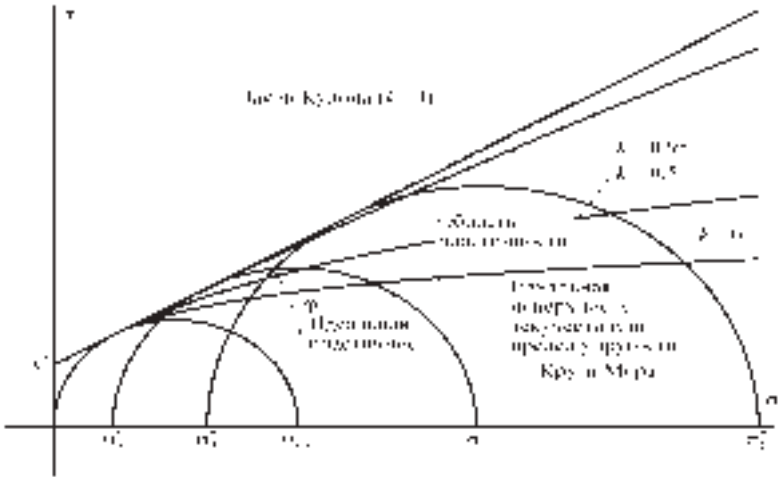


Рисунок 2. Поверхности пластического деформирования в координатной плоскости компонент напряжений на площадке среза.
Figure 2. Surfaces of plastic deformation in the coordinate plane of stress components at the shear area.

Отметим, что линейный критерий Кулона в приведенных напряжениях имеет вид:

$$\frac{\sigma_1-\sigma_3}{2}=\frac{\sigma_1'-\sigma_3'}{2}=\tau_{\max}=\sin\varphi\frac{\sigma_1'+\sigma_3'}{2} \quad (5)$$

Заметим, что зависимость, подобную (3), в качестве критерия прочности предлагал О. Мор, однако вместо среднего геометрического (пропорционального) нормального напряжения (3) рекомендовалась функция (в первом приближении линейная) от среднего арифметического главных напряжений. Сравнивая выражения (4) и (5), приходим к тому же выводу. Кроме того, зависимость (4) имеет явное сходство с законом сухого трения Амонтона.

Отметим для общности, что уравнение (2) является решением следующего дифференциального уравнения [2, 3]:

$$\mathrm{tg}\left(\frac{\pi}{4}+\frac{\varphi}{2}\right)-\sqrt{\frac{C+\dfrac{\sigma_1 d\tau}{d\sigma_n}}{C+\dfrac{k\sigma_3 d\tau}{d\sigma_n}}}=0$$

В критерии (1) и (2) входит так называемый параметр упрочнения k, нуждающийся в интерпретации. О физических предпосылках его введения более подробно речь пойдет далее, а на данном этапе поясним необходимость его привлечения с логических позиций.

Коэффициент упрочнения k вводится в расчетную схему посредством выражений:

$$\sigma_n=\sigma_1\cos^2\psi+k\sigma_3\sin^2\psi;\ \tau=0,5\left(\sigma_1-\sigma_3\right)\sin^2\psi, \quad (6)$$

где ψ – угол наклона площадки среза к минимальному главному напряжению σ_3.

Выражение (6) физически означает, что в процессе упрочнения минимальное главное напряжение не в полной мере передается на нормаль к площадке сдвига, что снижает эффект внутреннего трения (подобно поровому давлению). Таким образом, предлагается новый физический аспект протекания процесса пластического деформирования (упрочнения) горных пород при сдвиге: главным признаком пластической деформации на стадии упрочнения является частичная или полная (на пределе упругости) потеря удерживающего эффекта от внутреннего трения на площадках микросдвигов под действием минимального главного напряжения и его постепенное усиление в процессе упрочнения, что является следствием явления дилатансии, т. е. увеличения объема в направлении минимального главного напряжения.

Итак, для понимания смысла введенного коэффициента ответим на вопрос, чем отличается микросдвиг в процессе пластической деформации образца от сдвига частей этого же образца при окончательном разделении его на части (разрушении). И в первом и во втором случае происходит срез и выполняется предельное условие, например Кулона, при этом известно, что поверхность текучести (предел упругости) должна находиться внутри (ниже) предельной поверхности (рис. 2). Таким образом, приходим к противоречию: с одной стороны, поверхность текучести должна совпадать с предельной, а с другой, предел упругости всегда ниже предела прочности, но при одинаковых значениях сцепления и угла внутреннего трения это невозможно (условие специального предельного равновесия отсутствует). Единственной причиной данного несоответствия является различие в передачи нормального напряжения на площадке сдвига на пределе упругости и на пределе прочности. И действительно, согласно критерию Кулона, предельное касательное напряжение зависит только от сцепления, угла внутреннего трения и нормального напряжения. При постоянстве первых для разных масштабных (иерархических) уровней, что для континуальной среды следует считать аксиоматичным, различия в предельных значениях касательных напряжений объясняются только различием нормальных напряжений. Параметр упрочнения k в зависимости (6) призван учитывать данное несоответствие. Нормальное напряжение на площадке сдвига определяется величинами главных напряжений и углом ее наклона. Однако именно аномальность деформирования в направлении минимального главного напряжения (разность знаков напряжения и деформации) является причиной введения параметра упрочнения k в качестве множителя к минимальному главному напряжению (6). Кроме того, пределы изменения параметра упрочнения $0 \le k \le 1$ делают удобным его использование именно в качестве множителя, а не уменьшаемого к минимальному главному напряжению, как при учете порового давления.

В связи со сказанным необходимо указать еще на одно несоответствие в феноменологической науке по вопросам прочности твердых тел и, прежде всего, горных пород. Дело в том, что паспорта прочности, построенные способом косого (прямого) среза и с использованием кругов Мора, т. е. способом стабилометрических испытаний, сильно отличаются [5]. Паспорт на косой срез в плоскости σ_n, τ положе своего объемного аналога, т. е. расположен внутри паспорта объемных испытаний и оконтуривает меньшую область. Убедительных объяснений данному несоответствию до сегодняшнего дня не дано, тем не менее предпочтение отдается именно паспорту прочности, полученному стабилометрическими испытаниями с построением кругов Мора [5]. При испытаниях на косой (прямой) срез в эксперименте непосредственно измеряются компоненты напряжений σ_n, τ, по значениям которых непосредственно строится паспорт прочности. При стабилометрических испытаниях компоненты напряжений σ_n, τ непосредственно в эксперименте не измеряются. Парадокс заключается в том, что при стабилометрических испытаниях определяются предельные главные напряжения σ_1, σ_3, а паспорт строится в осях σ_n, τ. В связи с этим несоответствие данных паспортов прочности может быть объяснено только некорректным пересчетом предельных главных напряжений σ_1, σ_3 в систему координат σ_n, τ. Неточность заключается в том, что при пересчете используется уравнение (6) с параметром упрочнения, равным единице ($k = 1$), что эквивалентно построению огибающей (паспорта прочности) с использованием кругов Мора. В действительности экспериментальные данные показывают [4], что коэффициент упрочнения на пределе прочности, как правило, значительно меньше единицы ($k < 1$).

Физический смысл параметра упрочнения k кроется в процессе дилатансии, который и отличает связные, пластичные и хрупкие материалы при действии на них нагрузки. Именно дилатансией объясняется разупрочнение горных пород в пластической фазе. Согласно сегодняшним представлениям [6–12], дилатансия связана с образованием площадок микросдвигов и примыкающих к ним трещинам отрыва, параллельным максимальному главному сжимающему напряжению (назовем такой механизм дилатансии поступательным). Удаление берегов разрывных трещин, развитие микротрещиноватости внутри породы с соответствующим увеличением пустотного пространства и приводит, по мнению упомянутых авторов, к дилатансии, т. е. увеличению объема в направлении действия минимального главного напряжения (и общему увеличению объема) под действием приложенного девиаторного напряжения. Как отмечается в работе [12], большинство трещин, определяющих дилатансию, почти параллельны максимальному главному напряжению. Кроме того, энергетически выгоднее расти трещинам растяжения, при этом трещины отрыва генерируются трещинами сдвига [12]. Из последнего непонятно, что значит энергетически выгоднее, и каков механизм образования отрывных трещин под влиянием сдвиговых.

Поступательным характером протекания процесса дилатансии, т. е. скольжением по микротрещине, можно объяснить образование отрывных трещин позади сдвиговых, однако такой механизм протекания пластической деформации не объясняет многих других эффектов.

1. Частичная или полная потеря удерживающего эффекта от действия минимального главного напряжения. Возрастание этого эффекта, т. е. рост параметра k по мере упрочнения вплоть до предела прочности (параметр упрочнения k на пределе прочности всегда выше, чем на пределе упругости). То есть вообще неясно, за счет чего физически возрастает k, т. е. идет упрочнение.

2. Почему при достаточно однородном напряженном состоянии в образце не происходит прорастание микросдвигов до полного среза образца при увеличивающемся девиаторе напряжений во время упрочнения?

3. Отсутствие дилатансии при одноосном испытании и ее усиление (увеличение объемных изменений) при росте бокового обжатия (минимального главного напряжения) до некоторого предела и снижение до нуля (полное отсутствие дилатансии) при некотором предельном значении минимального напряжения [8].

По-видимому, существующее воззрение на механизм пластического деформирования нуждается в некотором дополнении или модификации.

Вопрос, по сути, эквивалентный первым двум, задает в своей статье П. В. Макаров [13]: как поврежденная среда может быть прочнее менее поврежденной при меньших неупругих деформациях?

И действительно, почему же не образуется мегатрещина в образце, ведь напряженное состояние является достаточным для этого, более того, оно непрерывно возрастает (увеличение девиатора напряжений). С классических позиций поступательного характера пластической деформации на этот вопрос вряд ли можно ответить. Попытаемся ответить на этот вопрос, оставаясь при этом в сугубо континуальных рамках, т. е. не прибегая к неоднородности, зернам, иерархии дезинтеграции и т. д. Пусть в какой-то момент времени начинается пластическая деформация образца горной породы или твердого тела, проявляющаяся в возникновении микросдвиговых площадок под определенным углом, соответствующим конкретному уровню и характеру напряженного состояния. Повышение девиатора напряжений при постоянстве прочих других параметров должно привести к прорастанию микросдвиговых площадок вплоть до полного среза образца (разделения на две части), однако этого не происходит, а образец продолжает накапливать в своем объеме микросдвиги. Объяснить это явление можно только переориентировкой или изменением угла наклона сдвиговых площадок. То есть механизм разворота площадок среза препятствует развитию магистральной трещины в образце. Но такая переориентировка должна приводить к разрыхлению внутри образца, последствия этого разрыхления и принято называть дилатансией. Отсюда становится понятным и механизм увеличения параметра упрочнения k, он обусловлен как раз дилатансией, т. е. расклиниванием – внутренними источниками повышения сдвиговой прочности. Таким образом, вращение сдвиговых площадок (структурных блоков) и явление дилатансии – это неизбежность, необходимая для сохранения сплошности всей механической системы (образца). То есть система перед разрушением стремится использовать все имеющиеся ресурсы для предотвращения этого.

По-видимому, описанный механизм пластического деформирования присущ материалам пластического разрушения. Для материалов хрупкого разрушения, для которых предел упругости практически совпадает с пределом прочности, зародившаяся микротрещина с увеличением девиатора напряжений быстро прорастает.

В работах [2, 3] показано, что наклон площадки среза (микросдвига) к минимальному главному напряжению на различных стадиях упрочнения определяется по формуле:

$$\mathrm{tg}\psi = \sqrt{\frac{1+\dfrac{\mathrm{tg}\varphi\,\sigma_1}{C}}{1+\dfrac{\mathrm{tg}\varphi k\,\sigma_3}{C}}} \tag{7}$$

Максимальное значение угол принимает при $k = 0$, что для некоторых горных пород соответствует началу пластического упрочнения (предел упругости), а минимальное при $k = 1$ и составляет значение $\pi/4 + \varphi/2$.

Воспользовавшись уравнением (1), угол наклона площадки сдвига (7) выразим через параметры паспорта прочности и компоненты главных напряжений:

$$\mathrm{tg}\,\psi = \frac{2\left(C + \mathrm{tg}\,\varphi\,\sigma_1\right)}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad \text{или} \quad \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \mathrm{ctg}\,\psi\left(C + \mathrm{tg}\,\varphi\,\sigma_1\right). \tag{8}$$

Уравнение (8) фактически представляет собой критерий пластичности и прочности, выраженный через наклон сдвиговой площадки к минимальному главному напряжению.

Таким образом, для выполнения условия предельного равновесия на образованных и вновь образуемых в процессе пластического упрочнения сдвиговых площадках необходимо, чтобы угол ψ в процессе упрочнения уменьшался. Если по какой-либо причине этого не происходит, произойдет срез всего образца, по-видимому, под достаточно крутым углом. Таким образом, мы пришли к важнейшему выводу, что физической основой упрочнения или его механизмом является разворот сдвиговых площадок, что и позволяет повышать предел прочности (предельное максимальное главное напряжение). Уменьшение угла наклона вновь появляющихся сдвиговых площадок относительно начальных также объясняется упрочнением, т. е. увеличением нормального напряжения на сдвиговой площадке. Поступательным характером дилатансии явление упрочнения объяснить невозможно.

В таком случае потерю удерживающего эффекта минимальным главным напряжением на начальной стадии пластического деформирования можно объяснить формированием, вследствие разворота сдвиговых площадок, структурных элементов (рис. 3). То есть окаймляющие микросдвиговую площадку отрывные трещины не позволяют минимальному главному напряжению увеличить нормальное напряжение на площадке среза.

Теперь попытаемся разобраться, какую роль в процессе дилатансии играет минимальное главное напряжение. Увеличение минимального напряжения от опыта к опыту приводит к более крутым углам наклона микротрещин на пределе упругости, что можно легко проверить, используя формулу (8). Это, в свою очередь, означает больший угол разворота площадок, а значит больший прирост объемных деформаций. Однако очевидно это имеет свой предел. После некоторого порогового значения минимального главного напряжения разворот блоков в процессе упрочнения ограничивается, вплоть до полного запрета. В этом случае материал разрушается как пластическая среда. Для проверки данной гипотезы по формуле (8) были рассчитаны углы ψ на пределе упругости и прочности для горных пород при различных соотношениях σ_3/σ_1 с использованием данных монографии [6]. Анализ полученных результатов (в силу громоздкости в данной работе не приводятся) позволяет сделать следующие важные выводы:

1) практически для всех представленных типов горных пород точки экстремума для углов разворота и относительных объемных деформаций совпадают, т. е. максимальные значения разворотов площадок и максимальные значения объемных изменений имеют место при одинаковых значениях σ_3/σ_1;

2) для каждого типа горных пород рост угла поворота площадок от опыта к опыту ведет к увеличению объемных изменений;

3) для горных пород с модулем упругости (определен при одноосном испытании) $E \approx 60 \times 10^9$ Па и более углы разворота, как правило, не превышают $\Delta\psi \approx 1^\circ$, достигая при этом для менее жестких материалов, например, для цемента, величины $\Delta\psi \approx 4^\circ$.

Приведенные выводы, хоть и косвенно, но подтверждают высказанное ранее предположение.

Таким образом, в процессе пластического упрочнения непрерывно образуются площадки микросдвигов, которые синхронно меняют свою ориентировку по отношению к направлению главных напряжений. То есть на момент достижения предела прочности все площадки сориентированы к главным напряжениям примерно под одним углом. Прорастание генерального разлома или объединение микросдвиговых трещин происходит за пределом прочности тогда, когда энергии в образце и концентрация трещин достаточны для их укрупнения. Другими словами, возможный механизм явления перехода от накопления объемных повреждений в процессе пластического деформирования к росту магистральной трещины (замирание деформационной активности) и соответствующее падение напряжений могут быть объяснены с той позиции, что в момент прорастания (собственно разрушения) микротрещины сориентированы под одним углом, дальнейшее изменение (разворот) их невозможен (рост упругого сопротивления) и в силу концентраций напряжений происходит их соединение по принципу анизотропной среды и сброс накопившейся в объемах упругой энергии. Если по какой-либо причине развития генерального разлома не образуется (недостаточная концентрация микротрещин), в окрестности микродефектов будет продолжать накапливаться упругая энергия, что, по-видимому, может привести к динамическому разрушению.

Уравнения (7) и (8) определяет кинематические характеристики разворота сдвиговых площадок (угол разворота). Однако остается непонятной динамика разворота блоков, а именно природа момента сил, вызывающего данный разворот.

О природе и величине собственного момента блоков (сдвиговых площадок) при пластическом деформировании континуума

Красной нитью в вопросах пластического деформирования и прочности [13–16], геотектоники, сейсмологии, геофизики, геомеханики [17–23] и др. прослеживается тезис о вихревом протекании процессов пластического деформирования и разрушения материалов и горных пород, ротационном характере движения тектонических плит, волновом характере перераспределения напряжений в массиве, волнах крутильной поляризации, нелинейных волнах маятникового типа, распространении и перераспределении энергии деформационного процесса в виде медленных деформационных или тектонических волн и движений и т. д. Другими словами, процесс деструкции, перераспределения напряжений и волновые процессы протекают в виде трансляционного смещения структурных элементов и их разворота, т. е. по схеме сдвиг + поворот [13–23].

Главной проблемой при создании моделей деформирования блочной среды является отсутствие физической интерпретации появления собственного момента силы геоблоков (спина). Согласно исследованиям А. В. Викулина [17, 18] по геотектонике, момент силы связан с вращением Земли. Исследователями [19, 20] данный момент вводится посредством привлечения несимметричного тензора напряжений (механика Коссера). Впрочем, такой подход достаточно категорично критикуется в работе [17], указывается на бездоказанность использования несимметричного тензора в рамках теории упругости, на отсутствие физического смысла моментной теории упругости с термодинамической позиции, а также на неуравновешенность кинетического момента всего тела и т. д. В работе [14] указывается, что на сегодняшний день, ввиду отсутствия данных о природе собственного момента блоков, чисто феноменологически его можно рассматривать как произведение касательного напряжения на длину площадки сдвига.

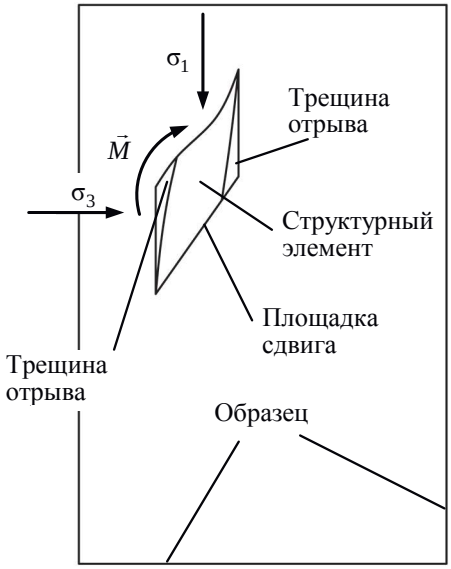


Рисунок 3. Модель пластического деформирования образца.
Figure 3. Model of plastic deformation of the sample.

И действительно, пока среда находится в упругой стадии деформирования, в каждой ее точке выполняется закон парности касательных напряжений, при выполнении которого уравновешиваются моменты сил, однако при появлении площадок микросдвигов (относительном перемещении частей тела) реакции перераспределяются так, чтобы более эффективно препятствовать разрушению, что приводит к нарушению закона парности касательных напряжений и возникновению активного момента сил. Это соответственно приводит к переориентировке осей главных напряжений в окрестности площадки сдвига. Такое перераспределение связано с появлением трения по берегам трещины.

В рамках проведенных исследований по созданию теории устойчивости откосов как континуальной среды по методу предельного равновесия [1] автором было доказано, что на стадии пластического деформирования материалов, т. е. при сдвиге по трещине (микротрещине), общая упругая реакция должна быть направлена так, как показано на рис. 4, а ее модуль определяется по формуле:

$$R = \left(\tau - \operatorname{tg}\varphi\,\sigma_n - C\right) l \cos\varphi, \tag{9}$$

где l – длина площадки среза.

Отметим, что при таком направлении действия реакция совершает минимальную работу при перемещении частей тела [1]. Другими словами, минимизируется работа упругой реакции при пластическом деформировании.

Согласно рис. 4 и зависимости (9), в точке возникает активный момент силы, равный:

$$M = \left(\tau - \operatorname{tg}\varphi\,\sigma_n - C\right) l \cos\varphi\, r \sin\left(\vartheta - \varphi\right), \tag{10}$$

где r – радиус (средний полуразмер) блока; ϑ – угол наклона площадки к оси, совпадающей с направлением действия минимального главного напряжения, в начальный момент зарождения сдвиговой площадки.

Деформационные волны и волны напряжений в горных породах и массивах

В последние годы все большее применение в различных областях науки находит так называемое уравнение sin-Гордона, или более общее уравнение Клейна–Гордона [18–21]. Его использование в сейсмологии и геомеханике объясняется тем, что оно имеет решения в виде кинков, бризеров, уединенных волн (солитонов), быстрых и медленных кно-

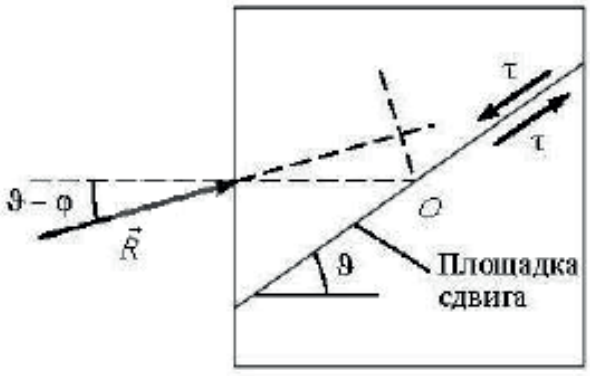


Рисунок 4. Модель пластического деформирования образца.
Figure 4. Model of plastic deformation of the sample.

идальных волн, и каждому из них соответствует свой ход эволюции системы блоков и разломов. Кроме того, солитон sin-Гордона может останавливаться без изменения своей топологии и вновь приходить в движение. Но самое главное существование такого рода волн в горном массиве, описываемых уравнением sin-Гордона, подтверждается экспериментальными геофизическими исследованиями [21].

Будем рассматривать образец горной породы как среду, на макроуровне в которой происходит пластическое течение (межблоковые подвижки), а на микроуровне (в структурном элементе) сохраняется упругая связь, т. е. линейная связь между моментом силы и кривизной граней блоков [20]. Покажем, как получить уравнение, описывающее динамическое поведение такой среды. Исходя из теоремы об изменении кинетического момента

$$I\frac{\partial^2\vartheta}{\partial t^2}=\left(\tau-\operatorname{tg}\varphi\,\sigma_n-C\right)l\cos\varphi\, r\sin\left(\vartheta-\varphi\right)-M_x-M_y, \tag{11}$$

где I – момент инерции структурного элемента; M_x, M_y – моменты упругого сопротивления.

Моменты упругого сопротивления определяются из соотношений:

$$M_x=EJ\frac{\partial}{\partial x}\Delta\vartheta_x;\Delta\vartheta_x=\frac{\partial\vartheta}{\partial x}dx\approx a\frac{\partial\vartheta}{\partial x};M_x=A\frac{\partial^2\vartheta}{\partial x^2};M_y=B\frac{\partial^2\vartheta}{\partial y^2}, \tag{12}$$

где EJ – жесткость среды; A, B – упруго-геометрические постоянные; a – размер элемента вдоль оси x.

Таким образом, уравнение (11) с учетом зависимостей (12) будет иметь вид:

$$I\frac{\partial^2\vartheta}{\partial t^2}+A\frac{\partial^2\vartheta}{\partial x^2}+B\frac{\partial^2\vartheta}{\partial y^2}=\left(\tau-\operatorname{tg}\varphi\,\sigma_n-C\right)l\cos\varphi\, r\sin\left(\vartheta-\varphi\right). \tag{13}$$

Уравнение (13) представляет собой уравнение sin-Гордона и имеет ряд решений, содержащих в том числе медленные волны.

Аналогично можно получить уравнения, определяющие поступательное смещение среды вдоль площадок микросдвигов, для этого необходимо использовать второй закон Ньютона.

Вариационный принцип сдвиговой дезинтеграции твердых тел

Как известно, в различных отраслях знаний (естественные, технические, гуманитарные науки) существуют наиболее общие законы, определяющие поведение систем без детального их рассмотрения. При этом некоторая величина (функционал), как правило, определяющая работу или энергию, стремится к экстремуму. Такие общие принципы называются вариационными. Имеются такие принципы и в механике разрушения, они определяют траекторию или геометрию поверхностей дезинтеграции. Авторами [24, 25] поверхности дезинтеграции рассматриваются как геодезические линии на поверхности тела. Кроме того, сделано предположение, что элемент длины трещины определяется произведением линейного элемента поверхности на некоторую функцию, зависящую от напряженного состояния. На основе данного подхода было решено несколько частных задач по нахождению форм поверхностей дезинтеграции. В частности, для равномерно растянутого плоского тела, авторы [24, 25] в качестве поверхностей дезинтеграции предлагают совокупность правильных шестигранников. Интуитивно авторами утверждается, что поверхности дезинтеграции имеют наименьшую длину и охватывают наибольшую площадь разрушения, однако из частных примеров доказать это не представляется возможным. С другой стороны, авторами априори поверхность дезинтеграции рассматривается как геодезическая линия, поэтому минимальность длины поверхности дезинтеграции была заведомо обеспечена. Кроме того, решаемая вариационная задача (функционал) не учитывала свойств разрушаемого материала (только напряженное состояние), что для сдвигового характера разрушения крайне важно.

В работах [2, 3] аналитически получен вариационный принцип, определяющий функцию поверхности (траекторию) разрушения. Форма поверхностей сдвиговой дезинтеграции в твердых телах (горных породах) определяется максимальной работой внешних ΣV и объемных $\Sigma(W-U)$ сил на относительном перемещении частей тела при срезе, при этом минимизируется энергия, затрачиваемая на создание данных поверхностей $\Sigma 2\eta$:

$$\frac{\int\limits_N V\left(x,y,y'\right)dn+\int\limits_S\left[W\left(x,y,y'\right)-U\left(x,y,y'\right)\right]dS}{\int\limits_L 2\eta\left(x,y,y'\right)dl}\to\max, \tag{14}$$

где $A=W-U$ – удельная работа объемных сдвигающих W и удерживающих U сил на возможном перемещении системы при сдвиговой дезинтеграции (сдвиговый потенциал отсека); V – удельная работа поверхностных сил; 2η – удельная поверхностная энергия разрушения единицы длины трещины при срезе; dn – элемент нагруженной поверхности тела.

Данный принцип аналогичен принципу минимума диссипации энергии современной концепции естествознания [26]: если возможно множество сценариев протекания процесса, согласных с законами сохранения и связями, наложенными на систему, то в реальности процесс протекает по сценарию, которому отвечает минимальное рассеяние энергии, т. е. минимальный прирост энтропии.

То есть если процесс дезинтеграции (диссипации энергии) неизбежен, то он будет протекать с минимальным рассеянием энергии. Другим требованием вариационного принципа (14) является оконтуривание, по возможности, большей упругой энергии.

Из принципа (14) следуют достаточно важные выводы. Если внешняя нагрузка постоянна, а объемные силы отсутствуют или ими можно пренебречь, то в однородной среде поверхностями дезинтеграции будут являться плоскости (рис.

5, а). Примером является дезинтеграция образца горной породы под нагрузкой (рис. 5, б), массива горных пород под действием тектонических напряжений. Отметим, что данный результат совпадает со статикой сыпучей среды, где первое и второе семейства характеристик при отсутствии собственного веса вырождаются в изогональные системы прямых.

Рассмотрим случай, когда A и η постоянны, а внешняя нагрузка отсутствует. В этом случае решением вариационного уравнения (14) при отсутствии дополнительных условий для объемной задачи является сфера, а в плоском случае – окружность. Данный результат следует из так называемой изопериметрической задачи (задача Дидоны) и закона ее взаимности. То есть при фиксированной длине максимальную площадь оконтуривает окружность и, наоборот, при заданной площади окружность имеет минимальный периметр.

Длительное время при расчете устойчивости откосов используется поверхность скольжения в виде дуги окружности (рис. 5, в). В действительности ее отдельные части очень близки по форме к дугам окружностей [1].

Аналогично происходит формирование кольцеобразных перенапряженных зон вокруг подземных горных выработок – явление зональной дезинтеграции (рис. 5, г), где отдельные сдвиговые трещины своей совокупностью (ломаная линия, включающая сдвиговые и отрывные трещины) в зонах дезинтеграции оконтуривают повышенный потенциал (наблюдается дискование керна), минимизируя длину зон дезинтеграции.

Таким образом, поверхностями дезинтеграции минимизируются площади (объемы) с пониженным потенциалом (пластические) и увеличиваются площади с повышенным потенциалом (перенапряженные, упругие, энергоемкие области), при этом минимизируется энергия, затрачиваемая на создание поверхностей дезинтеграции (их длина).

В работе [27] приводится следующий пример: если на смесь двух различных газов наложить градиент температуры, то один из газов концентрируется вблизи горячей стенки, а второй – вблизи холодной. В результате такой кластеризации энтропия смеси становится ниже, чем в том случае, когда смесь была бы однородной. По-видимому, кластеризация энергии в твердых телах поверхностями дезинтеграции по степени энергонасыщения имеет подобную природу.

Примечательно, что для сыпучих горных пород ($\varphi = 0$) процесс дезинтеграции будет продиктован экстремумом числителя выражений (14), который выражает не что иное как вариационный принцип Лагранжа (принцип минимума для смещений).

Используя зависимость (14), а также результаты работы [1] аналитически доказываем, что радиус кривизны поверхности сдвиговой дезинтеграции пропорционален разности главных напряжений (радиусу круга Мора) и обратно пропорционален объемной силе поля (объемному весу), которая создает данные предельные напряжения:

$$|R| = \frac{\left[1+\mathrm{tg}^2\psi\right]^{3/2}}{\mathrm{tg}\,\varphi\,\mathrm{tg}\,\psi}\,\frac{\sigma_1-\sigma_3}{\gamma}, \tag{15}$$

где ψ – угол наклона площадки среза к минимальному главному напряжению, который в первом приближении можно принять равным $\pi/4 + \varphi/2$.

Таким образом, кривизна поверхности дезинтеграции является индикатором вида напряженного состояния и его изменения в теле. Из выражения (15) следует, что постоянная кривизна (радиус) означает постоянную разность главных напряжений или одноосное напряженное состояние в каждой точке. Для идеально связных пород и материалов поверхностью дезинтеграции является плоскость. Из зависимости (15) также следует, что чем прочнее материал, тем кривизна

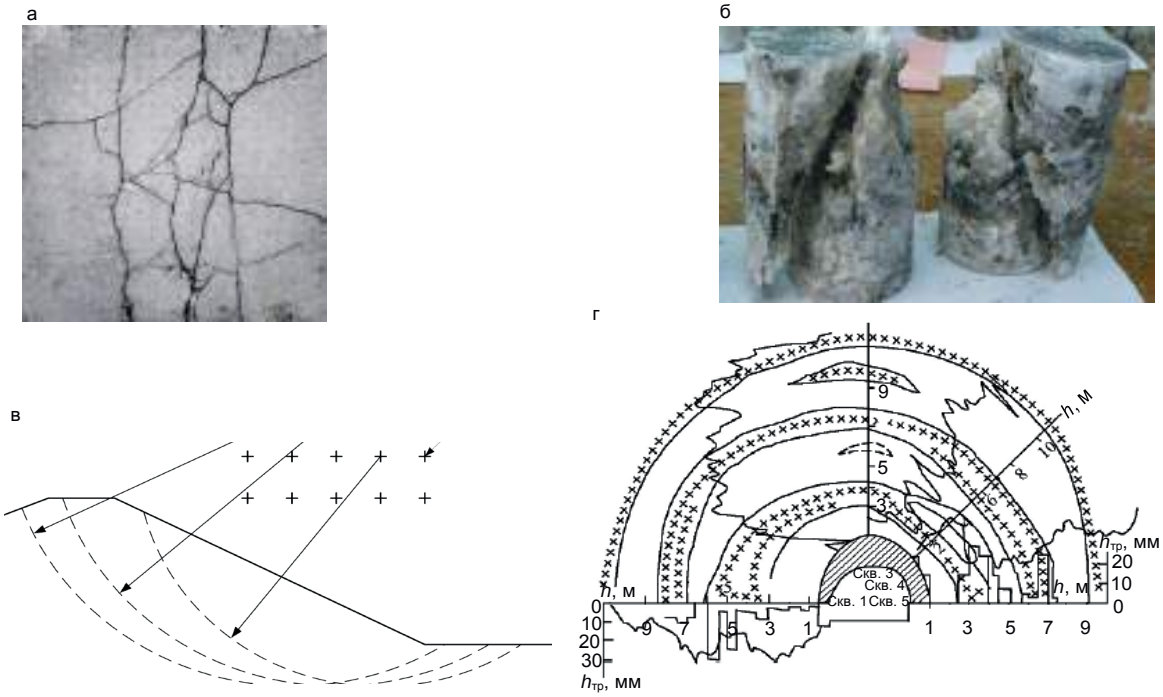


Рисунок 5. Примеры дезинтеграции. а – дезинтеграция твердого тела плоскостями; б – разрушение образцов горной породы; в – круглоцилиндрическая поверхность скольжения; г – зональная дезинтеграция.

Figure 5. Examples of disintegration. а – disintegration of a solid by planes; б – destruction of rock samples; в – a cylindrical sliding surface; г – zonal disintegration.

поверхности сдвиговой дезинтеграции меньше.

Параметр иерархии при дезинтеграции горных массивов или критерий роста трещины

Многочисленными исследованиями доказывается, что существует некоторая фундаментальная константа, в строгом согласии с которой происходит дезинтеграция, разрушение (дробление) горных пород и других материалов [28]. Считается, что именно закономерность при дезинтеграции является причиной иерархического строения горного массива. Данная константа определяет критерий роста трещины, т. е. формирование следующего иерархического уровня структуры массива. То есть для формирования или прорастания трещины длиной, соответствующей $i + 1$-му уровню иерархии, необходим поперечный размер области, в λ раз превышающий размер $i + 1$-го уровня, который в свою очередь включает λ размеров структур i-го порядка иерархии. Другими словами, межтрещинное расстояние, необходимое для создания трещин заданной длины, будет являться линейным размером следующего иерархического уровня (то есть если трещина укрупнилась в три раза, для этого ей было необходимо количество энергии, заключенной примерно в девяти поперечных блоках, а их соотношение и характеризует постоянную иерархии: 3/1 и 9/3).

Сразу оговоримся, что иерархическое строение массива наблюдается не повсеместно. Ярким примером отсутствия всяческой иерархии является сланцеватость, т. е. поверхности дезинтеграции присутствуют, а вложений блоков не наблюдается. Условием для возникновения вложений является дезинтеграция горных массивов под воздействием накопленной и распределенной в нем энергии, т. е. без притока дополнительной энергии – замкнутая система.

Таким образом, одним из фундаментальных свойств горного массива является его блочно-иерархическое строение (рис. 6). По-видимому, на это свойство горного массива одним из первых обратил внимание М. А. Садовский (1989), отметив при этом, что отношения размеров соседних уровней иерархии дают приблизительно одно и то же число (иерархическая постоянная дезинтеграции), равное 3,5 [29].

Согласно исследованиям [30], существует некоторая пороговая концентрация начальных трещин или дефектов, ниже которой трещины ведут себя независимым образом, а выше – появляются коллективные дефекты, т. е. появление ансамблей (или кластеров) дефектов, в которых трещины могут сливаться (укрупняться). Исследования по физике твердого тела (С. Н. Журкова, проф. В. С. Куксенко и др., 1977), показывают, что концентрационный критерий укрупнения трещин $e \approx 3$.

Коэффициент линейного вложения блоков, по данным М. В. Курлени и В. Н. Опарина (1992–1994), в рамках геомеханических исследований оценивается значениями 2–5 [31].

Несмотря на то что данные величины получены в различных отраслях знаний и при исследовании различных материалов, по мнению автора, данные константы имеют одну природу, обусловливаемую закономерностью дезинтеграции твердых тел. К таким же выводам приходит П. В. Макаров в своей обобщающей работе [28].

Однако данные значения определены эмпирически и не имеют теоретической основы, а самое главное, физической интерпретации.

Исходя из сказанного, для определения критерия роста трещины на следующий иерархический уровень или определения постоянной иерархии необходимо определить относительный размер области, необходимой для накопления достаточной энергии при создании трещины заданной длины.

Если предположить, что вся накопленная в некоторой области твердого тела энергия полностью и без дополнительных притоков будет расходоваться на создание новых поверхностей разрушения (свободное разрушение, по Е. И. Шемякину [32]), то, согласно закону сохранения энергии ($2\eta l = AS$), отношение $2\eta/A = AS/l$ в вариационном принципе (14) будет характеризовать линейный отрезок области, перпендикулярный вновь образованной сдвиговой трещине, достаточный для ее создания. Таким образом, искомый размер, для плоского случая определится зависимостью [4]:

$$L = \frac{2\rho\eta}{A} = \frac{2\rho\sqrt{1 + \mathrm{tg}^2\psi}}{\mathrm{tg}\,\psi - \mathrm{tg}\,\varphi}, \tag{16}$$

где ψ – угол наклона площадки среза к минимальному главному напряжению; $\rho \equiv l$ – некоторая постоянная для однородного массива величина.

Подставим в уравнение (16) приближенно значение $\psi = \pi/4 + \varphi/2$ и получим

$$L = 4\rho \sin\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right). \tag{17}$$

Очевидно, что величина ρ в формуле (17) представляет собой критический размер образовывающейся структуры, зависящий от абсолютного значения подводимой упругой энергии. Таким образом, коэффициент вложения блоков (отношение размеров блоков соседних уровней иерархии) или фундаментальный параметр иерархии при сдвиговой деструкции определится зависимостью:

$$\lambda = \frac{L}{\rho} = 4\sin\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right). \tag{18}$$

Перейдем к анализу выражения (18). Учитывая пределы изменения угла внутреннего трения, будем иметь:

$$\lambda = 2{,}828_{\varphi = 0} \ldots 3{,}696_{\varphi = \pi/4}. \tag{19}$$

Другими словами, образование трещин будет возможно только тогда, когда отношение расстояний между ними к их длине будет являться некоторой константой, продиктованной законом сохранения энергии. Данный размер межтрещинного участка необходим для накопления в нем достаточной энергии для создания плоскости дезинтеграции

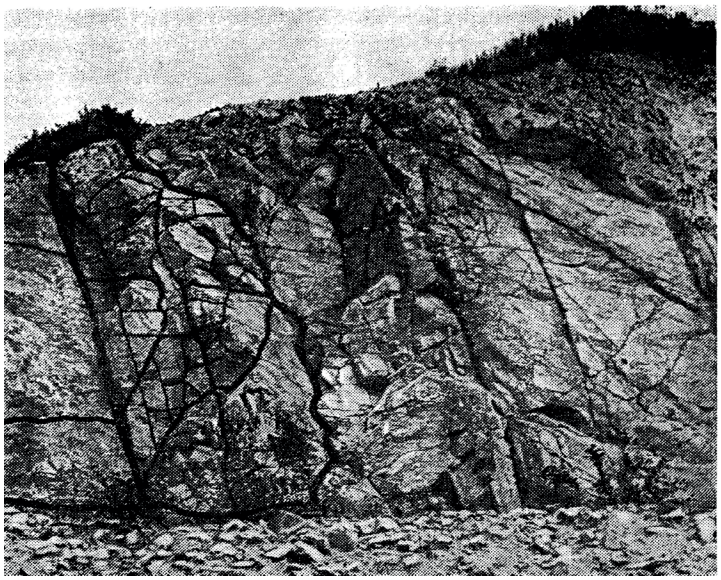


Рисунок 6. Блочно-иерархическое строение горного массива.
Figure 6. Block hierarchical structure of the massif.

заданного размера. Если размер больше, то и трещина будет длиннее, т. е. соотношения (18) и (19) будут выполняться, конечно, в случае отсутствия рассеяния и притока энергии.

Для осредненного значения отношений размеров блоков соседних рангов, равного 3,5 по М. А. Садовскому, исходя из уравнения (18) имеем $\varphi \approx 32^{o}$, что достаточно точно соответствует скальному массиву.

Анализ полученных результатов наводит на мысль о том, что масштабный фактор зональной дезинтеграции α [31] должен каким-то образом быть связан с параметром иерархии λ при деструкции горных массивов, да и вообще иметь физический смысл. На взгляд автора, упомянутая связь выражается зависимостью [2–4]:

$$\alpha = \frac{\lambda}{2} = 2\sin\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right). \tag{20}$$

У параметра иерархии (18) появляется вполне явное и логическое толкование. Чем больше угол внутреннего трения, тем больше энергии тратится на создание новых поверхностей (структур) данных размеров, а значит, межтрещинное расстояние также возрастает. Таким образом, физический смысл критерия (18) – показатель диссипации энергии при создании поверхностей дезинтеграции. В средах, где диссипация энергии за счет внутреннего трения отсутствует, т. е. $\varphi = 0$, $\lambda = 2\sqrt{2}$ что равно удвоенному значению масштабного фактора дезинтеграции α, по В. Н. Опарину [31].

В работе [13] автором эмпирически для углей обоснован универсальный принцип делимости, или закон роста масштабов деструкции:

$$L_{n+1} / L_n \approx 1,618 \approx \Phi; L_{n+1} / L_{n-1} \approx 2,618 \approx \Phi^2,$$

где Ф – число золотой пропорции.

Примечательно, что среднее значение масштабного фактора дезинтеграции, согласно зависимостям (19) и (20) [4]:

$$\alpha_{ср} = 1,631 \approx 1,618 = \Phi. \tag{21}$$

Равенство (21) выполняется с точностью менее 1%. Примем теперь для углей среднее справочное значение $\varphi = 20^{o}$, тогда согласно (20) $\alpha = 1,638 \approx 1,618 = \Phi$, которое также выполняется с точностью около 1 %.

Таким образом, аналитически получен масштабный фактор дезинтеграции, обоснована его зависимость от угла внутреннего трения как параметра диссипации энергии при разрушении, т. е. дана его физическая интерпретация.

Заключение

Методы континуальной механики расчета напряженно-деформированного состояния и механики разрушения твердых тел в геомеханике в большинстве своем достаточно длительное время сводятся к банальным линейным системам механики сплошной среды и тривиальным линейным феноменологическим критериям прочности. В связи с этим в науке о разрушении материалов укоренилось мнение о невозможности континуальной механики объяснить многообразие нелинейных процессов, наблюдаемых при деструкции материалов. И это в известной степени так хотя бы только потому, что в рамках одной модели в принципе невозможно выявить все закономерности явлений, происходящие в сложных динамических нелинейных системах. Однако более глубокий континуальный анализ позволил аналитически выявить нелинейные свойства среды в процессе пластического деформирования, которые достаточно хорошо согласуются с результатами экспериментов и наблюдаемыми явлениями. По мнению автора, полученные результаты могут быть полезны для дальнейшей интеграции континуальных и микроскопических представлений (мезоуровень) об эволюции сложных нелинейных динамических систем при протекании необратимых процессов, а также создания общей теории таких систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жабко А. В. Аналитическая геомеханика. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2016. 224 с.
2. Жабко А. В. Законы пластического деформирования и деструкции твердых тел // Изв. УГГУ. 2017. № 2 (46). С. 82–87.
3. Жабко А. В. Прочность континуума (твердых тел) // Изв. вузов. Горный журнал. 2017. № 4. С. 47–55.
4. Жабко А. В. Теоретические и экспериментальные аспекты пластического деформирования и разрушения горных пород // Изв. УГГУ. 2018. № 1 (49). С. 68–79.
5. Карташов Ю. М., Матвеев Б. В., Михеев Г. В. и др. Прочность и деформируемость горных пород. М.: Недра, 1979. 269 с.
6. Ставрогин А. Н., Протосеня А. Г. Пластичность горных пород. М.: Недра, 1979. 301 с.
7. Ставрогин А. Н., Тарасов Б. Г., Ширкес О. А., Певзнер Е. Д. Прочность и деформация горных пород в допредельной и запредельной областях // ФТПРПИ. 1981. № 6. С. 3–11.
8. Ставрогин А. Н., Протосеня А. Г. Прочность горных пород и устойчивость выработок на больших глубинах. М.: Недра, 1985. 271 с.
9. Ставрогин А. Н., Тарасов Б. Г. Экспериментальная физика и механика горных пород. СПб.: Наука, 2001. 343 с.
10. Куксенко В. С., Гузев М. А., Макаров В. В. и др. Концепция сильного сжатия горных пород и массивов // Вестник ДВГТУ. 2011. № 3/4 (8/9). С. 14–58.
11. Одинцев В. Н. Отрывное разрушение массива скальных горных пород. М.: ИПКОН РАН, 1996. 166 с.
12. Кочарян Г. Г. Деформационные процессы в массивах горных пород. М.: МФТИ, 2009. 378 с.
13. Макаров П. В. Самоорганизованная критичность деформационных процессов и перспективы прогноза разрушения // Физическая мезомеханика. 2010. № 13 (5). С. 97–112.
14. Макаров П. В. Подход физической мезомеханики к моделированию процессов деформации и разрушения // Физическая мезомеханика. 1998. № 1. С. 61–81.
15. Панин В. Е., Егорушкин В. Е. Основы физической мезомеханики пластической деформации и разрушения твердых тел как нелинейных иерархически организованных систем // Физическая мезомеханика. 2015. № 18 (5). С. 100–113.
16. Панин В. Е., Гриняев Ю. В., Псахье С. Г. Физическая мезомеханика: достижения за два десятилетия развития, проблемы и перспективы // Физическая мезомеханика. 2004. № 7. Спец. вып. Ч. I. С. I-25–I-40.
17. Викулин А. В., Иванчин А. Г. О современной концепции блочно-иерархичесого строения геосреды и некоторых ее следствиях в области наук о Земле // ФТПРПИ. 2013. № 3. С. 67–84.
18. Викулин А. В., Махмудов Х. Ф., Иванчин А. Г. и др. О волновых и реидных свойствах земной коры // Физика твердого тела. 2016. Т. 58, вып. 3. С. 547–557.
19. Гарагаш И. А. Уединенные тектонические волны в верхней мантии // Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле: Четвертая тектонофиз. конф. ИФЗ РАН. 2016. С. 456–460.
20. Гарагаш И. А., Николаевский В. Н. Механика Коссера для наук о Земле // Вычислительная механика сплошных сред. 2009. Т. 2, № 4. С. 44–66.
21. Быков В. Г. Нелинейные волны и солитоны в моделях разломно-блоковых геологических сред // Геология и геофизика. 2015. Т. 56, № 5. С. 1008–1024.
22. Курленя М. В., Опарин В. Н. Проблемы нелинейной геомеханики // ФТПРПИ. 1999. Ч. I. № 3. С. 12–26.
23. Курленя М. В., Опарин В. Н. Проблемы нелинейной геомеханики // ФТПРПИ. 2000. Ч. II. № 4. С. 3–26.
24. Морозов Е. М., Фридман Я. Б. Траектории трещин хрупкого разрушения как геодезические линии на поверхности тела // ДАН СССР. 1961. Т. 139, № 1. С. 87–90.
25. Левин В. А., Морозов Е. М., Матвиенко Ю. Г. Избранные нелинейные задачи механики разрушения. М.: Физматлит, 2004. 408 с.
26. Тихонов А. И. Концепция современного естествознания. Иваново: Изд-во ИГЭУ, 2002. 68 с.
27. Николс Г., Пригожин И. Самоорганизация в неравновесных системах: от диссипативных структур к упорядоченности через флуктуации / пер. с англ. В. Ф. Пастушенко; под ред. Ю. А. Чизмаджева. М.: Мир, 1979. 512 с.
28. Макаров П. В. Об иерархической природе деформации и разрушения твердых тел и сред // Физическая мезомеханика. 2004. № 7 (4). С. 25–34.
29. Садовский М. А. Естественная кусковатость горной породы // ДАН СССР. 1979. Т. 247, вып. 4. С. 829–831.
30. Куксенко В. С., Инжеваткин И. Е., Манжиков Б. Ц. и др. Физические и методические основы прогнозирования горных ударов // ФТПРПИ. 1987. № 1. С. 9–22.
31. Опарин В. Н., Курленя М. В. О скоростном разрезе Земли по Гутенбергу и возможном его геомеханическом объяснении. Ч. 1. Зональная геодезинтеграция и иерархический ряд геоблоков // ФТПРПИ. 1994. № 2. С. 14–26.
32. Шемякин Е. И. О свободном разрушении твердых тел // ДАН СССР. 1988. Т. 300. С. 1090–1094.

Статья поступила в редакцию 05 июля 2019 г.

УДК 539.(4+4.011+42)+622.(011.4+02+023.23) https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-3-111-123

Continuum theory of shear disintegration of solid bodies

Andrey Viktorovich ZHABKO*

Ural State Mining University, Russia, Ekaterinburg

Urgency of the research. Material strength issues are fundamental in any technical science. The issues of destruction are especially relevant in mining, where the main technological processes are aimed at the destruction of rocks (drilling, blasting, crushing, etc.); the production method (method of working) or mining is selected from the condition of stability (strength) of the mining array.
Purpose of the work. The work is devoted to determining the laws of plastic deformation and disintegration of rocks (solids) based on their representation as a continuous (continuum) medium.
Research methods, results and conclusions. The author proposes some new laws of plastic deformation obtained analytically on the basis of continuum fracture mechanics such as the functions of the yield surface and plastic potential, the strength criterion of solids, the equation that determines the intrinsic moment of blocks (formed structures) during plastic deformation, dynamic equations (evolutionary) of the fragmented structures behavior, the variational principle of the disintegration of solids, the criterion for the growth or appearance of a crack of any scale (hierarchical level), closely related to the fundamental parameter of the hierarchy of mountain ranges and the number of Phidias. Some effects and phenomena of the processes occurring during plastic deformation, disintegration (destruction) have been identified, explained and discussed. In particular, it has been experimentally shown, that the main sign of plastic deformation at the hardening stage is the partial or complete (at the elastic limit) loss of the retaining effect of internal friction in the minute movement sites under the action of the minimum primary stress and its gradual strengthening during hardening, which is a consequence of the phenomenon of dilatancy, i.e., an increase in volume in the direction of the minimum primary stress. It is shown that, turning of shear areas (structural elements) from continuum positions is an inevitability that postpones the fracture moment; in the absence of rotational deformation, an instantaneous cut of the sample will occur. This explains the proximity of the elastic and tensile limits for brittle materials. That is, a criterion for the separation of materials into brittle and plastic is outlined. The possible mechanism of the transition from the accumulation of volumetric damage during plastic deformation to the growth of the main crack (fading of the deformation activity) and the corresponding drop of potentials, which can be explained in terms of tiny fractures: when appearance (while fracturing) they are pointed out at one angle, and a further change in their orientation (turn) is impossible (increase in elastic resistance) and, due to stress concentrations, they are connected according to the anisotropic substance.
Keywords: plastic potential function, plasticity and strength criterion, dilatancy, hierarchy parameter, variational principle, moment of blocks, sin-Gordon equation.

REFERENCES

1. Zhabko A. V. 2016, *Analiticheskaya geomekhanika* [Analytical geomechanics], 224 p.
2. Zhabko A. V. 2017, Laws of plastic deformation and destruction of solids. *Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta* [News of the Ural State Mining University], no. 2 (46), pp. 82–87. (*In Russ.*)
3. Zhabko A. V. 2017, Strength of the continuum (solids). *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal* [News of the Higher Institutions. Mining Journal], no. 4, pp. 47–55. (*In Russ.*)
4. Zhabko A. V. 2018, Theoretical and experimental aspects of plastic deformation and fracture of rocks. *Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta* [News of the Ural State Mining University], no. 1 (49), pp. 68–79. (*In Russ.*)
5. Kartashov Yu. M., Matveyev B. V., Mikheyev G. V. et al. 1979, *Prochnost' i deformiruyemost' gornykh porod* [Strength and deformability of rocks], Moscow, 269 p.
6. Stavrogin A. N., Protosenya A. G. 1979, *Plastichnost' gornykh porod* [Plasticity of rocks]. Moscow, 301 p.
7. Stavrogin A. N., Tarasov B. G., Shirkes O. A., Pevzner E. D. 1981, Strength and deformation of rocks in the prelimiting and out-of-limit areas. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh* [Physicotechnical issues of mining], no. 6, pp. 3–11. (*In Russ.*)
8. Stavrogin A. N., Protosenya A. G. 1985, *Prochnost' gornykh porod i ustoychivost' vyrabotok na bol'shikh glubinakh* [Rock strength and stability of workings at great depths]. Moscow, 271 p.
9. Stavrogin A. N., Tarasov B. G. 2001, *Eksperimental'naya fizika i mekhanika gornykh porod* [Experimental physics and rock mechanics]. Saint-Petersburg, 343 p.
10. Kuksenko V. S., Guzev M. A., Makarov V. V. et al. 2011, The theory of strong compression of rocks and massifs. *Vestnik DVGTU* [The Far Eastern Federal University: School of Engineering Bulletin], no. 3/4 (8/9), pp. 14–58. (*In Russ.*)
11. Odintsev V. N. 1996, *Otryvnoye razrusheniye massiva skal'nykh gornykh porod* [Breakout of rock massif]. Moscow, 166 p.
12. Kocharyan G. G. 2009, *Deformatsionnyye protsessy v massivakh gornykh porod* [Deformation processes in rock masses]. Moscow, 378 p.
13. Makarov P. V. 2010, Self-organized criticality of deformation processes and prospects for fracture prediction. *Fizicheskaya mezomekhanika* [Physical Mesomechanics]. no. 13 (5), pp. 97–112. (*In Russ.*)
14. Makarov P. V. 1998, The approach of physical mesomechanics to modeling the processes of deformation and fracture. *Fizicheskaya mezomekhanika* [Physical Mesomechanics], no. 1, pp. 61–81. (*In Russ.*)
15. Panin V. E., Egorushkin V. E. 2015, Fundamentals of physical mesomechanics of plastic deformation and fracture of solids as non-linear hierarchically organized systems. *Fizicheskaya mezomekhanika* [Physical Mesomechanics], no. 18 (5), pp. 100–113. (*In Russ.*)
16. Panin V. E., Grinyaev Yu. V., Psakhye S. G. 2004, Physical mesomechanics: achievements in two decades of development, problems and prospects. *Fizicheskaya mezomekhanika* [Physical Mesomechanics], no. 7, special issue p. I, pp. I-25–I-40. (*In Russ.*)
17. Vikulin A. V., Ivanchin A. G. 2013, On the modern concept of the block-hierarchical structure of the geomedium and some of its consequences in the field of earth sciences. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh* [Physicotechnical issues of mining], no. 3, pp. 67–84. (*In Russ.*)
18. Vikulin A. V., Makhmudov H. F., Ivanchin A. G. et al. 2016, On the wave and reid properties of the earth's crust. *Fizika tverdogo tela* [Physics of the solid state], vol. 58, issue 3, pp. 547–557. (*In Russ.*)
19. Garagash I. A. 2016, *Uyedinennyye tektonicheskiye volny v verkhney mantii* [Solitary tectonic waves in the upper mantle]. Tectonophysics and current issues of Earth sciences: Fourth tectonophysical conference, pp. 456–460.
20. Garagash I. A., Nikolaevsky V. N. 2009, Cosserat Mechanics for Earth Sciences. *Vychislitel'naya mekhanika sploshnykh sred* [Computational continuum mechanics], vol. 2, no. 4, pp. 44–66. (*In Russ.*)
21. Bykov V. G. 2015, Nonlinear waves and solitons in models of fault-block geological media. *Geologiya i geofizika* [Geology and geophysics], vol. 56, no. 5, pp. 1008–1024. (*In Russ.*)

* zhabkoav@mail.ru
http://orcid.org/0000-0002-3081-9522

22. Kurlenya M. V., Oparin V. N. 1999, Issues of nonlinear geomechanics. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh* [Physicotechnical issues of mining], p. I, no. 3, pp. 12–26. (*In Russ.*)
23. . Kurlenya M. V., Oparin V. N. 2000, Issues of nonlinear geomechanics. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh* [Physicotechnical issues of mining], p II, no. 4, pp. 3–26. (*In Russ.*)
24. Morozov E. M., Fridman Ya. B. 1961, Crack paths of fast fracture as geodesic lines on the surface of a body. *Doklady Akademii Nauk* [Proceedings of the Russian Academy of Sciences], vol. 139, no. 1, pp. 87–90. (*In Russ.*)
25. Levin V. A., Morozov Ye. M., Matviyenko Yu. G. 2004, *Izbrannyye nelineynyye zadachi mekhaniki razrusheniya* [Selected nonlinear problems of fracture mechanics]. Moscow, 408 p.
26. Tikhonov A. I. 2002, *Kontseptsiya sovremennogo yestestvoznaniy* [The concept of modern science]. Ivanovo, 68 p.
27. Nicolis G., Prigogine I. 1979, Exploring Complexity, 512 p.
28. Makarov P.V. 2004, On the hierarchical nature of deformation and fracture of solids and media. *Fizicheskaya mezomekhanika* [Physical Mesomechanics], no. 7 (4), pp. 25–34. (*In Russ.*)
29. Sadovsky M. A. 1979, Natural lumpiness of rock. *Doklady Akademii Nauk* [Proceedings of the Russian Academy of Sciences], vol. 247, issue 4, pp. 829–831. (*In Russ.*)
30. Kuksenko V. S., Inzhevatkin I. E., Manzhikov B. Ts. et al. 1987, Physical and methodological foundations of forecasting mountain strikes. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh* [Physicotechnical issues of mining], no. 1, pp. 9–22. (*In Russ.*)
31. Oparin V.N., Kurlenya M.V. 1994, On the high-speed section of the Earth according to Gutenberg and its possible geomechanical explanation. Part 1. Zonary geo-disintegration and hierarchical series of geoblocks. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh* [Physicotechnical issues of mining], no. 2, pp. 14–26. (*In Russ.*)
32. Shemyakin E. I. 1988, On the free destruction of solids. *Doklady Akademii Nauk* [Proceedings of the Russian Academy of Sciences], vol. 300, pp. 1090–1094. (*In Russ.*)

The article was received on July 05, 2019

УДК 622.4 https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-3-124-132

Критерии подобия гидровихревой локализации взрывов на горных предприятиях

Николай Петрович КОСАРЕВ[1,*]
Владимир Николаевич МАКАРОВ[1,**]
Александр Владимирович УГОЛЬНИКОВ[1,***]
Артем Юрьевич МАТЕРОВ[2,****]
Николай Владимирович МАКАРОВ[1,*****]
Александр Викторович ЛИФАНОВ[2,******]

[1]Уральский государственный горный университет, Россия, Екатеринбург
[2]ООО «Научно-производственный комплекс «ОйлГазМаш», Россия, Подольск

Динамика совершенствования техники и технологии пылеподавления в горно-металлургическом комплексе России показывает их недостаточную эффективность в обеспечении санитарно-гигиенических условий, локализации негативных техногенных процессов. Дальнейшее повышение эффективности добычи и глубокой переработки минерального сырья существенно ограничено несовершенством способов и средств локализации и ликвидации взрывов пылевых аэрозолей.
Цель. С использованием теории Гельмгольца о постоянстве циркуляции скорости по замкнутому контуру, формулы Био–Савара, идентичности диффузии и дисперсии завихренности вязкой несжимаемой жидкости, правила Фурье и П-теоремы определены критерии подобия процесса циркуляционной гетерокоагуляции с использованием модифицированной математической модели гидровихревого пылеподавления для повышения эффективности локализации взрывов пыли и аэрозолей на горных предприятиях.
Методика исследований. Установлено, что при устойчивом вращении капель жидкости в условиях гидровихревого пылеподавления изменяются кинематика и динамика процесса взаимодействия частиц пыли и капель жидкости в процессе гетерокоагуляции. При этом дифференциальные уравнениея, описывающие движение частиц пыли и капель жидкости в случае гидровихревого инерционного ортокинетического взаимодействия, гомогенны уравнениям, описывающим классическую гетерокоагуляцию. Получены уравнения для расчета эффективного краевого угла смачивания и минимального диаметра поглощаемых частиц пыли в функции от угловой скорости вращения капель жидкости. Определены критерии подобия, описывающие процесс гидровихревой ортокинетической гетерокоагуляции, построено критериальное уравнение, связывающее между собой критерии и индикаторы подобия в зависимости от угловой скорости вращения капель жидкости.
Результаты. Полученное критериальное уравнение подтвердило существенное влияние кинематики взаимодействия частиц пыли и капель жидкости в процессе гидровихревой гетерокоагуляции, что обусловлено снижением расклинивающего действия газовой среды в системе «твердое–жидкое», т. е. снижением потребной энергии для полного поглощения за счет увеличения поверхности смачивания. Установлено, что определяющими критериями подобия гидровихревой инерционной ортокинетической гетерокоагуляции являются критерии Рейнольдса и Стокса. Увеличение эффективного значения критериев Стокса и Рейнольдса в условиях гидровихревой коагуляции приводит одновременно к снижению его критического значения, что способствует уменьшению аэродинамического энергетического барьера. Сертификационные испытания с применением защищенных патентом вихревых форсунок подтвердили достаточность принятых критериев подобия гидровихревой инерционной ортокинетической гетерокоагуляции для подтверждения достоверности результатов прототипирования в лабораторных и промышленных условиях. Показано, что гидровихревая коагуляция существенно снижает размер диспергированного состава пыли, расход воды, повышая эффективность пылеподавления. Доказана возможность снижения минимального размера поглощаемой пыли в четыре раза, повышения эффективности пылеулавливания до 99 % при одновременном снижении расхода воды на 20 % по сравнению с классическим высоконапорным гидрообеспыливанием.
Область применения. С использованием предложенной математической модели разработана конструкция гидровихревой форсунки устройства пылеподавления и предотвращения взрывов АСПВ–МДВ для локализации зон образования мелкодисперсных взрывоопасных пылевых смесей, предотвращения техногенных аварий на горных предприятиях.

Ключевые слова: гомогенность, критерии, индикаторы подобия, экотехнология, пылеподавление, гетерокоагуляция, гидрофобность, циркуляция, угол смачивания, адгезия, энергия поглощения, присоединенный вихрь, ортокинетика, коэффициент захвата, коэффициент поглощения, энергетический барьер налипания, сила депрессии.

Введение

Интенсификация производства, внедрение новых технологий обеспечивающих эффективную добычу и переработку минерального сырья, сдерживает несовершенство технологий пылеподавления и локализации взрывов угольной пыли. Причинами образования взрывоопасной пылевоздушной среды являются высокая твердость и хрупкость горных пород, приводящие к интенсивному пылеобразованию при отделении горных пород от массива и их транспортировании. Взрывы газа и пыли имеют существенные различия, однако взрывчатые свойства газов и пыли имеют много общего, что делает возможным разработку комплексных методов снижения газовой и пылевой опасностей выемочных участков на горных предприятиях [1–4].

Травматизм от взрывов пыли на горных предприятиях с тяжелыми последствиями составляет более 8 %. Это определяет особую социальную значимость предупреждения и локализации взрывов пылевоздушных смесей в шахтах и защиты персонала. Мероприятия обеспечения пылевого режима в шахтах основаны на недопущении взрывоопасных скоплений пыли и предотвращении появления источника высокой температуры, способного воспламенить пылевые аэрозоли [5].

Кроме того, пыль негативно влияет на организм человека, вызывая заболевание легких силикоз – при воздействии породной пыли, антракоз – при воздействии угольной пыли. Особенно активно действуют на легкие человека частицы пыли размером (1–6) ·10–6 м.

* iuggu-journal@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0002-0128-5859
** uk.intelnedra@gmail.com
*** ugolnikov@yandex.ru
**** a.materov@oilgazmash.ru
***** mnikolay84@mail.ru
****** info@oilgazmash.ru

Наибольшую актуальность проблема взрыва пылегазовых смесей представляет для газообильных угольных шахт, и в первую очередь для подготовительных забоев, в которых происходит более половины аварий.

На шахтах с высокой газообильностью и выбросами горных пород и газа успешная борьба с образованием взрывоопасной пылегазовой среды возможна только на основе рационального сочетания пылеподавления и дегазации.

Исследования показывают, что более 60 % случаев образования взрывоопасной среды могут быть исключены при эффективном пылеподавлении.

Наиболее распространенным способом осаждения пыли из воздуха для локализации взрывов является пылеподавление, основанное на смачивании частиц пыли каплями жидкости при соударении с образованием при этом гетерокоагуляционной системы «капля–пылинка»; пылинка выпадает из воздуха и осаждается на поверхности [6–8].

Совершенствование системы локализации вероятных взрывов угольной пыли – составная часть проблемы пылевзрывозащиты горных предприятий, решение которой – одна из важнейших задач в области техники безопасности и охраны труда на ближайшие годы [1, 3, 7].

Эффект пылеподавления в существенной мере сводится к преодолению энергетического барьера в процессе столкновения капель жидкости с частицами пыли и переводу системы «твердое–жидкое» в более устойчивое состояние, т. е. определяется степенью коагуляции и способностью капель жидкости захватывать частицы пыли. Однако при высоконапорном гидрообеспыливании существенно растут энергозатраты на аэрацию, что снижает энергоэффективность процессов локализации техногенных аварий и, как результат, приводит к падению конкурентоспособности экотехнологии в недропользовании [8].

Актуальность совершенствования технологии высоконапорного гидрообеспыливания, внедрения инновационной техники локализации взрывов потребовала нового подхода к построению математической модели инерционной ортокинетической гетерокоагуляции водно-пылевого аэрозоля [9, 10].

Определяющую роль в увеличении эффективности коагуляционного взаимодействия капель воды и частиц пыли играет именно кинетическая энергия движения капель распыляемой воды, а не общий ее расход. Динамически активный начальный участок с высокой кинетической энергией капель жидкости при высоконапорном гидрообеспыливании играет определяющую роль в общей эффективности захвата и коагуляции пылевых частиц каплями воды.

В статьях [11, 12] предложена модель гидровихревого инерционного пылеподавления, исследован механизм ортокинетической коагуляции в условиях действия присоединенного вихря, индуцированного вращающейся каплей жидкости.

Методология исследований

На базе известной модели кинетической коагуляции частицы пыли каплей жидкости при $\omega_ж = 0$ в статье [11] разработана графическая модель гидровихревой ортокинетической коагуляции, построена система уровней, описывающая физический процесс коагуляции с участием дополнительной энергии присоединенного вихря.

Гидровихревая коагуляция позволяет управлять поверхностной энергией отрыва и растекания, обеспечивая взаимовлияние физических характеристик частиц пыли и капель жидкости с кинематическими параметрами, изменяющимися в связи с вращением капли жидкости с угловой скоростью $\omega_ж$.

В зоне контакта частица пыли будет двигаться по винтовой линии с углом спирали $\alpha = \mathrm{arctg}\left[d_п \sin\theta\, \omega_ж/(v_ж - v_г)\right]$ в глубь капли жидкости с поступательной скоростью $v_ж - v_г$, вращаясь при этом с угловой скоростью $\omega_ж$ [12, 13].

Захват частицы пыли каплей жидкости произойдет при условии, когда ее кинетическая энергия $W_к$ будет больше или равна энергии поглощения $П_{ж–г}$, соответствующей сумме энергии адгезии $W_{ад}$ ($F_{ад}$ – сила адгезии), определяемой удельной энергией отрыва, и энергии смачивания $W_{ж–г}$ ($W_{ж–г}$ – сила поверхностного натяжения), определяемой удельной энергией растекания [8].

С использованием предложенной графо-аналитической модели гидровихревого инерционного ортокинетического пылеподавления в статье [11] получено уравнение для минимального диаметра поглощаемой частицы пыли:

$$d_{п\omega\,\min} = \delta_{ж\text{-}г}\cos\cdot\arccos\left(\cos\theta + \frac{\pi\rho_ж d_п^3 \sin^4\theta\,\omega_ж^2}{8\delta_{ж\text{-}г}\cos\theta}\right)\left[(\rho_п - \rho_г)(v_ж - v_г)^{-2}\right], \quad (1)$$

где $d_{п\,\min}$ – минимальный диаметр поглощаемой частицы пыли, м; $\rho_п$, $\rho_г$ – плотность частицы пыли и газа соответственно, кг/м^3; $v_ж$, $v_г = v_п$ – скорость капли жидкости и скорость газа, равная скорости частицы пыли, м/с; $\delta_{ж–г}$ – коэффициент поверхностного натяжения на границе раздела двух сред «жидкость–газ», Дж/м^2; θ – краевой угол смачивания на границе раздела двух сред «жидкость–газ», рад.

С учетом изложенного уравнение для эффективной силы поверхностного натяжения, т. е. силы поверхностного натяжения, учитывающей энергию смачивания $W_{ж–г}$, определяемую силой поверхностного натяжения $F_{ж–г}$ и размером капли жидкости $d_ж$, физические характеристики соударяющихся частиц и дополнительную энергию, обусловленную влиянием присоединенного вихря, вызванного вращением капли жидкости в зоне контакта частицы пыли и капли жидкости, имеет вид:

$$F_{ж\text{-}г\,\omega} = F_{ж\text{-}г} - \Delta F_{ж\text{-}г\,\omega} = 2\frac{\delta_{ж\text{-}г}\cos\theta}{d_ж}\cdot\frac{\pi^2}{32} - \rho_ж d_п^4 \sin^4\theta\,\omega_ж^2 = 2\frac{\delta_{ж\text{-}г}\cos\theta_\omega}{d_ж}. \quad (2)$$

Уравнение для эффективного краевого угла смачивания в зоне контакта жидкой и твердой фазы, с учетом дополнительной энергии обусловленной вращением капли жидкости с угловой скоростью $\omega_ж$ и формулы (1)имеет вид:

$$\theta_\omega = \delta_{ж\text{-}г}\arccos\left(\cos\theta + \frac{\pi\rho_ж d_п^3 \sin^4\theta\,\omega_ж^2}{8\delta_{ж\text{-}г}\cos\theta}\right). \quad (3)$$

Предложенная математическая модель гидровихревой инерционной ортокинетической коагуляции подтверждает существенное отличие механизма взаимодействия частицы пыли и капли жидкости в процессе столкновения, влияние

угловой скорости вращения капли жидкости не только на кинематические параметры взаимодействия, но и на энергетические характеристики.

В литературе отсутствуют данные об исследовании процесса гидровихревого инерционного ортокинетического гетерокоагуляционного взаимодействия частиц пыли с каплями жидкости. Связанные с этим вопросы кинематики, динамики и физики этого явления до настоящего времени не имеют четкого понимания протекающих процессов и способов построения математических моделей.

В связи с изложенным большое значение приобретают методы экспериментального исследования на основе использования теории подобия и физического моделирования. Для проведения экспериментальных исследований и обоснованного использования полученных результатов необходимо установление критериев подобия, соответствующих конкретным физическим процессам гидровихревой коагуляции. В настоящее время нет единого представления о достаточном числе критериев подобия, определяющих взаимосвязь параметров в процессе инерционно-кинетического взаимодействия, тем более в условиях гидровихревой коагуляции. Весьма актуальной является задача построения критериального уравнения гидровихревого инерционного ортокинетического пылеподавления.

Экспериментальные исследования показывают, что основным критерием подобия физического процесса инерционной ортокинетической коагуляции является критерий Стокса Stk – «инерционный параметр», который в условиях гидровихревой коагуляции с учетом ранее сказанного можно представить в виде:

$$\mathrm{Stk}_{\text{пω}} = \frac{l_{\text{п}}}{d_{\text{ж}}} = \frac{\tau_{\text{П}}\left(v_{\text{ж}} - v_{\text{г}}\right)_{\text{эф}}}{d_{\text{ж}}} = \frac{\tau_{\text{п}}\sqrt{\left(v_{\text{ж}} - v_{\text{г}}\right)^2 + 0,25\,\omega_{\text{ж}}^2 d_{\text{п}}^2 \sin^2\theta_{\omega}}}{d_{\text{ж}}}, \tag{4}$$

где $l_{\text{п}}$ – длина инерционного пробега частицы пыли в газовой среде, м.

Таким образом, «инерционный параметр» Стокса $\mathrm{Stk}_{\text{п}\,\omega}$ зависит от угловой скорости вращения капли жидкости $\omega_{\text{ж}}$, возрастая с ее увеличением.

Процесс захвата каплей жидкости частицы пыли происходит в два этапа. На первом этапе частица пыли соприкасается с каплей жидкости, либо прилипает к ней. На втором этапе происходит слияние частицы пыли с каплей жидкости, т. е. коагуляция. В связи с этим процесс инерционного гидровихревого ортокинетического столкновения в системе «твердое–жидкое» разделяют на два понятия: эффективность столкновения – «коэффициент захвата» K_S, т. е. вероятность достижения частицей пыли поверхности капли жидкости и «эффективность коагуляции» – «коэффициент коагуляции» K_k,т. е. вероятность необратимого поглощения частицы пыли каплей жидкости.

Коэффициент захвата K_S определяется отношением количества частиц пыли, коснувшихся поверхности капли жидкости в процессе гидровихревого инерционного ортокинетического столкновения, к количеству частиц пыли, которые прошли бы через миделево сечение капли жидкости при условии, что траектории частиц пыли не искривляются в связи с изменением линий тока газа при обтекании капли жидкости. Многочисленными исследованиями установлено, что существует критическое значение критерия Стокса $\mathrm{Stk}_{\text{п. кр}}$, при котором эффективность столкновения $K_S = 0$ [8].

При $\mathrm{Stk}_{\text{п}} > \mathrm{Stk}_{\text{п. кр}}$ коэффициент эффективности столкновения определяется по формуле:

$$K_S = \frac{\mathrm{Stk}_{\text{п}}^2}{\mathrm{Stk}_{\text{п}} + a}, \tag{5}$$

где $a = f(\mathrm{Stk}_{\text{п}}, \mathrm{Re}_{\text{ж}})$; $\mathrm{Re}_{\text{ж}}$ – критерий Рейнольдса капли жидкости.

Таким образом, при $\mathrm{Stk}_{\text{п}} < \mathrm{Stk}_{\text{п. кр}}$ имеет место автомодельный режим гидровихревого инерционного ортокинетического столкновения, при котором аэродинамический энергетический барьер не позволяет осуществить коагуляционное взаимодействие, т. е. переход системы «твердое–жидкое» в стабильное энергетическое состояние.

Учитывая сказанное, можно утверждать, что при гидровихревой коагуляции в системе «жидкое–жидкое» коэффициент захвата K_S равен коэффициенту коагуляции K_k. В случае гидровихревого инерционного ортокинетического взаимодействия в системе «твердое–жидкое» процесс коагуляции происходит только при наличии достаточной кинетической энергии частицы пыли, которая должна преодолеть силы поверхностного натяжения, что подтверждает необходимость учета поверхностных явлений в процессе столкновения.

Для захвата гидрофобных частиц пыли каплей жидкости необходимо совершить работу внешних сил, к которым относится указанная кинетическая энергия частиц пыли и капли жидкости при их соударении.

В условиях гидровихревой инерционной ортокинетической коагуляции вследствие интенсивного закручивания капли жидкости вокруг вектора скорости $v_{\text{ж}}$ с угловой скоростью $\omega_{\text{ж}}$ существенно изменяются поверхностные явления в процессе столкновения. Вращение капли жидкости приводит к существенному уменьшению кривизны ее поверхности в зоне столкновения с частицей пыли, изменению параметров пограничного слоя, что, как показано ранее, способствует изменению угла смачивания θ_{ω}. Таким образом, при оценке уровней запрещающих энергетических барьеров, т. е. фактически установления зависимости эффективности коагуляции от параметров процесса столкновения, достаточно исследовать процесс изменения критических значений «инерционного параметра» $\mathrm{Stk}_{\text{п. кр}}$ от угловой скорости вращения капли жидкости в условиях гидровихревой коагуляции.

Учитывая сказанное и формулу (2), уравнение преодоления запрещающего энергетического барьера при гидровихревой инерционной ортокинетической коагуляции можно записать в виде:

$$W_k \geq F_{\text{ж-г}\,\omega} d_{\text{ж}} = W_{\text{ж-г}} - \Delta W_{\text{ж-г}\,\omega} = 2\delta_{\text{ж-г}}\cos\theta - \frac{\pi}{8}\rho_{\text{ж}} d_{\text{п}}^3 \sin^4\theta \cdot \omega_{\text{ж}}^2 = 2\delta_{\text{ж-г}}\cos\theta_{\omega}. \tag{6}$$

После соответствующих преобразований, с учетом уравнений (4), (5), (11) выражения для критического значения «инерционного параметра» Стокса получим в виде:

$$\mathrm{Stk}_{\text{пω кр}} = \tau_{\text{п}} \sqrt{\frac{24\,\delta_{\text{ж-г}} \cos\theta_{\omega}}{(\rho_{\text{п}} - \rho_{\text{г}}) d_{\text{п}}}} d_{\text{ж}}^{-1}. \tag{7}$$

Таким образом, с учетом изложенного задача определения эффективности коагуляции в условиях гидровихревого инерционного ортокинетического столкновения заключается в установлении зависимости критического значения инерционного критерия Стокса $\mathrm{Stk}_{\text{пω кр}}$ от угловой скорости вращения капли $\omega_{\text{ж}}$ жидкости и диаметра пылинки $d_{\text{пω}}$.

Из анализа формул (3), (7) вытекает, что с увеличением угловой скорости вращения частицы пыли увеличивается угол смачивания θ_{ω}, что приводит к увеличению критического значения критерия Стокса, позволяя тем самым обеспечить эффективное поглощение частиц пыли меньшего диаметра.

Гидровихревая инерционная ортокинетическая коагуляция частиц пыли и капель жидкости в динамически активном сегменте высоконапорного распыления происходит в потоке газа при больших числах Рейнольдса для капли жидкости. Для подобных условий в настоящее время нет единого мнения о достаточном числе критериев подобия, определяющих взаимозависимость параметров, характеризующих процесс коагуляции. Многие авторы полагают, что критерий Стокса не является единственным, определяющим эффективность инерционного захвата частицы пыли каплей жидкости, а тем более ее полного поглощения [8].

Для подтверждения факта, что зависимости критерия Стокса от критерия Рейнолдса капли жидкости и частицы пыли, построим критериальное уравнение взаимосвязи «инерционного параметра» Stk_{ω} в процессе гидровихревой инерционной ортокинетической коагуляции с индикаторами подобия.

Согласно правилу Фурье, слагаемые уравнений, описывающих физические явления, имеют одинаковую размерность. Следовательно, можно утверждать, что ранее указанные дифференциальные уравнения движения частиц в вязкой несжимаемой среде являются гомогенными. Применение П-теоремы в условиях отсутствия полной информации о механизме гидровихревой инерционной ортокинетической коагуляции базируется на следствии второго дополнительного положения В. А. Веникова о подобии сложных систем, согласно которым, «системы остаются подобными после упрощений при условии, что эти упрощения были проведены в них соответственно одинаково» [13].

Учитывая сказанное, в качестве основных независимых параметров, определяющих механизм гидровихревой инерционной ортокинетической коагуляции, примем:

– геометрические параметры $d_{\text{п}}$, $d_{\text{ж}}$, $d_{\text{см}}$;

– кинематические параметры $\sqrt{\left(v_{\text{ж}} - v_{\text{г}}\right)^2 + 0,25\,\omega_{\text{ж}}^2 d_{\text{п}}^2 \sin^2\theta\,\omega} = \left(v_{\text{ж}} - v_{\text{г}}\right)_{\text{эф}}$, $\omega_{\text{ж}}$;

– динамические параметры $(\rho_{\text{п}} - \rho_{\text{г}})$, $\rho_{\text{г}}$, $\mu_{\text{г}}$.

Для построения критериального уравнения гидровихревой инерционной ортокинетической коагуляции запишем взаимозависимость вышеуказанных независимых переменных в форме безразмерной степенной зависимости:

$$\mathrm{Stk}_{\text{пω}} = k d_{\text{ж}}^{a} d_{\text{п}}^{\beta} \mu_{\text{г}}^{\delta} \rho_{\text{г}}^{y} \left(\rho_{\text{п}} - \rho_{\text{г}}\right)^{z} \left(\sqrt{\left(v_{\text{ж}} - v_{\text{г}}\right)^2 + 0,25\,\omega_{\text{ж}}^2 d_{\text{п}}^2 \sin^2\theta\,\omega}\right)^{x} \left(\omega_{\text{ж}}\right)^{j} d_{\text{см}}^{\psi}. \tag{8}$$

Для нахождения критериев подобия составим полную матрицу размерностей независимых параметров.

$$\|M\| = \tag{9}$$

	$d_{\text{ж}}$	$d_{\text{п}}$	$\mu_{\text{г}}$	$\rho_{\text{г}}$	$\rho_{\text{п}} - \rho_{\text{г}}$	$\sqrt{\left(v_{\text{ж}} - v_{\text{г}}\right)^2 + 0,25\,d_{\text{см}}^2 \omega_{\text{ж}}^2}$	$\omega_{\text{ж}}$	$d_{\text{см}}$
M	1	1	–1	–3	–3	1	0	1
L	0	0	1	1	1	0	0	1
T	0	0	–1	0	0	–1	–1	0

Ранг матрицы $\|M\| = 3$, т. е. количество независимых переменных равно трем.

Количество чисел подобия, т. е. безразмерных комплексов, ключающих в себя и критерии подобия в соответствии с П-теоремой, составит:

$$K_{\pi} = n - m = 8 - 3 = 5, \tag{10}$$

где n – число размерных физических величин, $n = 8$; m – число независимых размерностей, $m = 3$.

Показатели степени α, β, δ, y, z, x, φ, ψ в критериальном уравнении по элементам матрицы (9) составляют однородную систему линейных уравнений:

$$\begin{cases} \alpha + \beta - \gamma - 3y - 3z + x + \psi = 0; \\ \gamma + y + z = 0; \\ \gamma + x + j = 0. \end{cases} \tag{11}$$

В соответствии с решением системы уравнений (11) получаем матрицу чисел подобия

$$\|M_\pi\| = \begin{array}{c|c|c|c|c|c|c|c|c|}
 & d_ж & d_п & \mu_г & \rho_г & \rho_П - \rho_Г & \sqrt{\left(v_ж - v_г\right)^2 + 0,25\, d_{см}^2 \omega_ж^2} & \omega_ж & d_{см} \\
\hline
\pi_1 & 0 & 2 & -2 & 2 & 0 & 2 & 2 & -1 \\
\hline
\pi_2 & -1 & 0 & 1 & -1 & 0 & -1 & -1 & -1 \\
\hline
\pi_3 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
\hline
\pi_4 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 1 \\
\hline
\pi_5 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\
\hline
 & \alpha & \beta & \gamma & y & z & x & j & \psi
\end{array} \qquad (12)$$

Раскрывая соответствующие определители матрицы (12), построим пять безразмерных комплексов, представляющих собой индикаторы подобия:

$$\pi_1 = \frac{\rho_г^2 d_п^2 \left(\left(v_ж - v_г\right)^2 + 0,25\, \omega_ж^2 d_{см}^2\right)}{\mu_г^2} = \mathrm{Re}_п^2, \qquad (13)$$

где $\mathrm{Re}_п$ – критерий Рейнольдса для частицы пыли;

$$\pi_2 = \frac{\mu_г}{d_ж \rho_г \sqrt{\left(v_ж - v_г\right)^2 + 0,25\, \omega_ж^2 d_{см}^2}} = \mathrm{Re}_ж^{-1}, \qquad (14)$$

где $\mathrm{Re}_ж$ – критерий Рейнольдса для капли жидкости;

$$\pi_3 = \frac{\rho_п - \rho_г}{\rho_г} = \pi_\rho = \mathrm{Ard}_{ст}, \qquad (15)$$

где $\mathrm{Ard}_{ст}$ – статический критерий Архимеда;

$$\pi_4 = \frac{\omega_ж d_п \sin\theta_\omega}{2\sqrt{\left(v_ж - v_г\right)^2 + 0,25 \omega_ж d_п^2 \sin\theta_\omega^2}} = \pi_k, \qquad (16)$$

где π_k – кинематический критерий подобия;

$$\pi_5 = \sin\theta_\omega = \pi_г, \qquad (17)$$

где $\pi_г$ – геометрический критерий подобия.

Коэффициент пропорциональности k в уравнении (8) определяем из выражения для $\tau_п = \frac{d_п^2(\rho_п - \rho_г)}{18\mu_г}$ [8].

С учетом изложенного и формул (13-17) уравнение (8) запишем в критериальной форме:

$$\mathrm{Stk}_{п\omega} = \frac{l_п}{d_ж} = \frac{\mathrm{Re}_п^2}{18\,\mathrm{Re}_ж}\mathrm{Ard}_{ст}\pi_k\pi_г = \frac{\mathrm{Re}_п d_п}{18\, d_ж}\mathrm{Ard}_{ст}\pi_k\pi_г = \frac{\tau_п\sqrt{\left(v_ж - v_г\right)^2 + 0,25\,\omega_ж d_п^2 \sin\theta_\omega^2}}{d_ж} = \mathrm{idem}. \qquad (18)$$

На рис. 1 приведены результаты расчета по предложенным критериальным уравнениям вихревой инерционной ортокинетической коагуляции изменения критических значений «инерционного параметра» Стокса $\mathrm{Stk}_{п\omega\,кр}$ в зависимости от угловой скорости вращения капель воды $\omega_ж$ диаметром $d_ж = 4,5 \cdot 10^{-6}$ м и диаметра частиц угольной пыли $d_{п\omega}$ при значении критерия Рейнольдса для капли жидкости $\mathrm{Re}_ж = 20$.

Анализ графиков, приведенных на рис. 1, подтверждает аналитический вывод об определяющей роли критерия Стокса в процессе гидровихревой гетерокоагуляции, существовании автомодельного режима гидровихревой коагуляции для диаметров угольной пыли $d_п < 5 \cdot 10^{-6}$ м. По мере увеличения угловой скорости вращения капли жидкости $\omega_ж > 0$ критические значения «инерционного параметра» $\mathrm{Stk}_{п\omega\,кр}$ существенно уменьшаются, что подтверждает эффективность полного поглощения мелкодисперсных частиц пыли. При угловой скорости вращения капли жидкости $\omega_ж = 400$ с$^{-1}$ критическое значение Стокса снижается более чем в 200 раз, позволяя полностью поглощать частицы пыли диаметром $5 \cdot 10^{-7}$ м.

Снижение энергетического барьера при гидровихревой коагуляции обусловлено снижением потребной кинетической энергии в связи со снижением энергии поверхностного натяжения, что подтверждается формулой (6) и уравнением (18). Основным фактором снижения «инерционного параметра» $\mathrm{Stk}_{п\omega\,кр}$ является увеличение угла смачивания θ_ω при гидровихревом взаимодействии частицы пыли с вращающейся каплей жидкости, что подтверждается формулами (2), (3) и уравнением (18). Кроме того, по мере снижения диаметра частиц диспергированной угольной пыли снижение «инерционного параметра» $\mathrm{Stk}_{п\omega\,кр}$ достигается кинематически за счет вращательного движения капли воды согласно

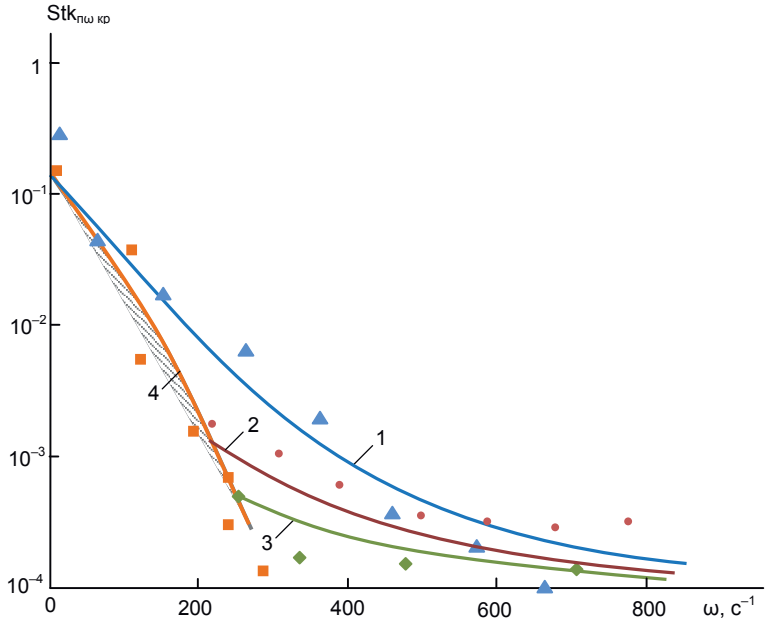


Рисунок 1. Зависимость критических значений критерия Стокса от угловой скорости вращения капель жидкости $\omega_ж$ для различных диаметров частиц пыли. 1 – $d_п$ = 5 × 10^{-6} м; 2 – $d_п$ = 2 × 10^{-6} м; 3 – $d_п$ = 5 × 10^{-7} м; 4 – граница автомодельности гидровихревой коагуляции.

Figure 1. The dependence of the critical values of the Stokes criterion on the angular velocity of rotation of liquid droplets ωzh for various diameters of dust particles. 1 – dp = 5 × 10^{-6} m; 2 – dp = 2 × 10^{-6} m; 3 – dp = 5 ×10^{-7} m; 4 – the boundary of self-similarity of vortex coagulation.

уравнениям (3), (7), способствующего уменьшению расклинивающего действия газа при контакте частиц пыли и капель воды, что обеспечивает полное поглощение частиц пыли меньшего диаметра по сравнению с классической коагуляцией.

При угловой скорости вращения капель жидкости $\omega_ж$ = 600 $с^{-1}$ значение $Stk_{пω\ кр}$ снижается более чем в сто двадцать раз по сравнению с его критическим значением, обеспечивающи полное поглощение частиц пыли в условиях поступательного движения капель жидкости, т. е. при $\omega_ж$ = 0. При этом критическое значение критерия Стокса $Stk_{пω\ кр}$, рассчитанное по формуле (12) с учетом формул (2)–(5), соответствуют с достаточной точностью его критическому значению полного поглощения, полученному экспериментальными исследованиями в условиях, определяемых критериальным уравнением (18).

Снижение величины критерия Рейнольдса для капель жидкости при гидровихревом высоконапорном гидрообеспыливании соответствует уменьшению скорости поступательного движения капли жидкости $v_ж$, т. е. уменьшению расхода воды, повышая ресурсоэффективность системы пылеподавления. Приведенные данные показывают, что при вихревом инерционном ортокинетическом гетерокоагуляционном взаимодействии вращающихся капель жидкости и не смачиваемых частиц пыли коэффициент захвата η_{Stk} будет равен коэффициенту коагуляции η_K при существенно меньших значениях критерия Рейнольдса, т. е. при меньших скоростях поступательного движения капли жидкости, либо меньших размерах частицы пыли.

Проведенные экспериментальные исследования подтвердили достаточную достоверность критериального уравнения гидровихревой инерционной ортокинетической коагуляции для применения его в целях обеспечения идентичности результатов моделей испытаний с реальными физическими процессами пылеподавления. Результаты расчетов по предложенной математической модели критериальных уравнений показали высокую эффективность гидровихревой инерционной ортокинетической коагуляции, позволившей на 25 % снизить расход воды, уменьшить минимальный размер поглощения абсолютно гидрофобных частиц угольной пыли до 5 · 10^{-7} м, повысить эффективность пылеподавления до 99 % в сравнении с классическим высоконапорным гидрообеспыливанием.

Выводы

1. Критериальные уравнения с достаточной точностью подтверждают гомогенность уравнений, описывающих процесс гидровихревого инерционного ортокинетического взаимодействия в системе «твердое–жидкое».

2. Вращение капель жидкости снижает расклинивающие действия газа в зоне контакта частиц пыли и капель жидкости, снижая величину потребной кинетической энергии полного поглощения частиц пыли, увеличивает эффективное значение критериев Стокса и Рейнольдса, способствует снижению их критических значений.

3. Результаты расчета критического значения «инерционного параметра» $Stk_{п.\ кр}$ по предложенным математическим моделям и экспериментальным исследованиям в условиях достижения максимальных значений коэффициента эффективности коагуляции K_k = 1 показали достаточную сходимость.

4. Критические значения инерционного показателя критерия Стокса в процессе гидровихревой инерционной ортокинетической коагуляции увеличиваются с увеличением угловой скорости вращения $\omega_ж$ капель жидкости и увеличиваются с уменьшением диаметра пылинок $d_п$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мохначук И. И. Проблемы безопасности на угледобывающих предприятиях // Уголь. 2008. № 2. С. 21–26.
2. Reed W. R., Organiscak J. A. Evaluation of dust exposure to truck drivers following the lead haul truck // Society for Mining, Metallurgy, and Exploration Annual Meeting, February 28–March 2, Salt Lake City, Utah. 2005. P. 147–153.
3. Handbook for dust control in mining / Ed. F. N. Kissell. Pittsburgh, PA, U.S.: Pittsburgh Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health, DHHS (NIOSH) Publication 2003-147 (IC 9465). 2003. 132 p. URL: https://www.cdc.gov/niosh/mining/works/coversheet1041.html
4. Джигрин А. В., Горлов Ю. В., Чигрин В. Д. Автоматическая система взрывоподавления – локализации взрывов метановоздушной смеси и угольной пыли в подземных горных выработках угольных шахт // Безопасность труда в промышленности. 2003. № 8. С. 22–26.
5. Толченкин Ю. А., Чекветадзе Ф. А., Разумняк Н. Л. Роль переподготовки руководителей и специалистов в повышении промышленной безопасности на шахтах отрасли // Уголь. 2007. № 10. С. 41–44.
6. Makarov V. N., Davydov S. Ya. Theoretical basis for increasing ventilation efficiency in technological processes at industrial enterprises // Refractories and Industrial Ceramics. 2015. Vol. 56, issue 1. P. 103–106. https://dx.doi.org/10.1007/s11148-015-9791-7
7. Либецкий К. Пылевые опасности в горнодобывающей промышленности. Польша, Катовице: Главный институт горного дела, 2004. 486 с.
8. Фролов А. В., Телегин В. А., Сечкерев Ю. А. Основы гидрообеспыливания // Безопасность жизнедеятельности. 2007. № 10. С. 1–24.
9. Bautin S. P. Mathematical simulation of the vertical part of an upward swirling flow // High temperature. 2014. Vol. 52, issue 2. P. 259–263. https://dx.doi.org/10.1134/S0018151X14020035
10. Способ создания подъемной силы и устройства для его осуществления: пат. 2601495 Рос. Федерация / Макаров Н. В., Макаров В. Н. заявл. 22.06.15; опубл. 11.10.16.
11. Макаров В. Н., Косарев Н. П., Макаров Н. В., Угольников А. В., Лифанов А. В. Эффективная локализация взрывов угольной пыли с использованием гидровихревой коагуляции // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2018. Т. 18, № 2. С. 178–189.
12. Макаров В. Н., Макаров Н. В., Потапов В. В., Горшкова Э. М. Перспективный способ повышения эффективности высоконапорного гидрообеспыливания // Вестник ЗабГУ. 2018. Т. 24, № 5. С. 13–20.
13. Веников В. А. Теория подобия и моделирования применительно к задачам электроэнергетики. М.: Высш. школа, 1966. 487 с.

Статья поступила в редакцию 12 марта 2019 г.

УДК 622.4 https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-3-124-132

Similarity parameters for hidro-vortex blast isolation in mining enterprises

Nikolay Petrovich KOSAREV[1,*]
Vladimir Nikolaevich MAKAROV[1,**]
Aleksandr Vladimirovich UGOL'NIKOV[1,***]
Artem Yur'evich MATEROV[2,****]
Nikolay Vladimirovich MAKAROV[1,*****]
Aleksandr Viktorovich LIFANOV[2,******]

[1]Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia
[2]LLC "NPC "OilGasMash", Podolsk, Russia

Dynamics of technological advancements and dust suppression techniques in the mining and metallurgical sector of Russia shows their insufficient effectiveness in ensuring sanitary and hygienic conditions, and containment negative technological processes. A further increase in the efficiency of extraction and deep processing of mineral raw materials is significantly limited by the imperfection of methods and means of containment and elimination of dust aerosol explosions.
Purpose. Similarity parameters for the process of circulating heterocoagulation using a modified mathematical model of hydro-vortex dust suppression are determined to increase the efficiency containment of explosions of dust and aerosols in mining enterprises using the Helmholtz theory of constancy of speed circulation over a closed loop, the Biot–Savard formula, the identity of diffusion and dispersion of the vorticity of a viscous incompressible fluid, the Fourier rule and the ∏-theorem,
Research Methodology. It was established that with steady rotation of liquid droplets under conditions of hydro-vortex dust suppression, the kinematics and dynamics of the process of interaction of dust particles and liquid droplets during heterocoagulation change. In this case, the differential equations describing the motion of dust particles and liquid droplets in the case of a hydro-vortex inertial orthokinetic interaction are homogeneous to the equations describing classical heterocoagulation. Equations are obtained for calculating the effective contact angle and the minimum diameter of the absorbed dust particles as a function of the angular velocity of rotation of the liquid droplets. Similarity parameters are defined that describe the process of hydro-vortex orthokinetic heterocoagulation, a criterion equation is built that links the similarity parameters and similarity indicators depending on the angular velocity of rotation of the liquid droplets.
Results. The obtained criterion equation confirmed the significant influence of kinematics of dust particles interaction and liquid droplets during the hydro-vortex heterocoagulation, which is due to a decrease in the proppant action of the gaseous medium in the solid-liquid system, that is, a decrease in the energy required for complete absorption due to an increase in the wetting surface. It was determined that the Reynolds and Stokes criteria are the determining criteria for the similarity of a hydro-vortex inertial orthokinetic heterocoagulation. An increase in the effective value of the Stokes and Reynolds criteria under conditions of hydro-vortex coagulation leads simultaneously to a decrease in its critical value, which contributes to a decrease in the aerodynamic energy barrier. Certification tests using patent-protected vortex nozzles confirmed the sufficiency of the accepted criteria for similarity of a hydro-vortex inertial orthokinetic heterocoagulation to confirm the reliability of the results of prototyping in laboratory and industrial conditions. It is shown that hydro-vortex coagulation significantly reduces the size of the dispersed dust composition, water consumption, increasing the efficiency of dust suppression. The possibility of reducing the minimum size of the absorbed dust by four times, increasing the efficiency of dust collection up to 99% while reducing water consumption by 20% compared with classical high-pressure hydrodedustry, is proved.
Application area. Using the proposed mathematical model, the design of a hydraulic vortex nozzle of a dust suppression and explosion prevention device ASPV – MDV was developed to localize the zones of formation of finely dispersed explosive dust mixtures and to prevent technological accidents at mining enterprises.

Keywords: homogeneity, parameters, indicators of similarity, environmental technology, dust suppression, heterocoagulation, hydrophobicity, circulation, angle of contact, adhesion, absorption energy, lift vortex, orthokinetics, capture ratio, absorption coefficient, energy barrier adhering, depression intensity.

REFERENCES

1. Mokhnachuk I. I. 2008, Security problems in coal mining enterprises. *Ugol'* [Coal], no. 2, pp. 21–26. (*In Russ.*)
2. Reed W. R., Organiscak J. A. 2005, Evaluation of dust exposure to truck drivers following the lead haul truck. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration Annual Meeting, February 28–March 2, Salt Lake City, Utah, pp. 147–153.
3. 2003, Handbook for dust control in mining. Ed. F. N. Kissell. Pittsburgh, PA, U.S.: Pittsburgh Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health, DHHS (NIOSH) Publication 2003-147 (IC 9465),132 p. URL: https://www.cdc.gov/niosh/mining/works/coversheet1041.html
4. Dzhigrin A. V., Gorlov Yu. V., Chigrin V. D. 2003, Automatic system for explosion suppression - localization of methane-air mixture explosions and coal dust in underground coal mine workings. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti* [Occupational safety in industry], no. 8, pp. 22–26 (*In Russ.*)
5. Tolchenkin Yu. A., Chekvetadze F. A., Razumnyak N. L. 2007, The role of retraining managers and experts in improving industrial safety in the mines of the industry. *Ugol'* [Coal], no. 10, pp. 41–44. (*In Russ.*)
6. Makarov V. N., Davydov S. Ya. 2015, Theoretical basis for increasing ventilation efficiency in technological processes at industrial enterprises. *Refractories and Industrial Ceramics*, vol. 56, issue 1, pp. 103–106. https://dx.doi.org/10.1007/s11148-015-9791-7
7. Libetskiy K. 2004, *Pylevyye opasnosti v gornodobyvayushchey promyshlennosti* [Dust hazards in the mining industry]. Poland, Katowice. Main Institute of Mining, 486 p.
8. Frolov A. V., Telegin V. A., Sechkerev Yu. A. 2007, Fundamentals of water dedusting. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti* [Life safety], no. 10, pp. 1–24. (*In Russ.*)
9. Bautin S. P. 2014, Mathematical simulation of the vertical part of an upward swirling flow. High temperature, vol. 52, issue 2, pp. 259–263. https://dx.doi.org/10.1134/S0018151X14020035

* ✉ iuggu-journal@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0002-0128-5859
** uk.intelnedra@gmail.com
*** ugolnikov@yandex.ru
**** a.materov@oilgazmash.ru
***** mnikolay84@mail.ru
****** info@oilgazmash.ru

10. Makarov N. V. 2016, Sposob sozdaniya pod"yemnoy sily i ustroystva dlya yego osushchestvleniya [Method of creating a raising force and device for its implementation]. Patent RF no. 2601495.
11. Makarov V. N., Kosarev N. P., Makarov N. V., Ugolnikov A. V., Lifanov A. V. 2018, Effective localization of coal dust explosions using hydro-vortex coagulation. *Vestnik PNIPU* [Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering]. *Geology*, vol. 18, no. 2, pp. 178–189. (*In Russ*.)
12. Makarov V. N., Makarov N. V., Potapov V. V., Gorshkova E. M. 2018, A promising way to increase the efficiency of high-pressure hydrodedusting. *Vestnik ZabGU* [Bulletin of the Transbaikal State University], vol. 24, no. 5, pp. 13–20. (*In Russ*.)
13. Venikov V. A. 1966, *Teoriya podobiya i modelirovaniya primenitel'no k zadacham elektroenergetiki* [The theory of similarity and modeling as applied to the tasks of the electric power industry]. Moscow, 487 p.

The article was received on March 12, 2019

УДК 621.867.2 https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-3-133-140

Моделирование взаимодействия ленты с перекошенным барабаном конвейера

Александр Алексеевич РЕУТОВ*

Брянский государственный технический университет, Россия, Брянск

Актуальность работы. Эксплуатация ленточных конвейеров показывает, что перекосы барабанов относительно номинального положения являются одной из главных причин интенсивного износа ленты, просыпания груза, увеличения энергопотребления. Известны случаи возгорания ленты при длительном трении о стойки става.

Цель работы: установление закономерностей движения ленты на перекошенном барабане конвейера, определение параметров силового и кинематического взаимодействия ленты с приводным и неприводным барабанами с учетом механических характеристик привода, ленты и их контактного взаимодействия.

Метод проведения работы: компьютерное моделирование движения ленты на перекошенном барабане конвейера как многомассовой динамической системы с учетом механических характеристик привода, ленты и их контактного взаимодействия с использованием программного комплекса «Универсальный механизм».

Результаты работы и область их применения. Разработана компьютерная многомассовая динамическая модель движения ленты на перекошенном барабане конвейера, позволяющая более точно определять параметры силового и кинематического взаимодействия ленты с приводным и неприводным барабанами по сравнению с известными аналитическими моделями. Компьютерная модель учитывает механические характеристики привода, ленты и их контактного взаимодействия. Компьютерную модель и установленные закономерности движения ленты на перекошенном барабане конвейера целесообразно использовать при проектировании ленточных конвейеров горных предприятий.

Выводы. Установлено, что проекция F_x главного вектора сил контакта ленты с барабаном на ось *X* является оценкой центрирующего воздействия барабана на ленту. Проекция F_o главного вектора сил контакта ленты с барабаном на ось барабана определяет осевую нагрузку подшипников барабана. Проекции главного вектора F_x и F_o достигают максимального значения при перекосе барабана в плоскости *XZ* на угол 0,05–0,07 рад, а затем незначительно уменьшаются. При перекосе барабана в плоскости *XY* на угол до 0,2 рад проекция F_x возрастает нелинейно. Проекция F_o достигает максимального значения при перекосе барабана в плоскости *XY* на угол 0,05–0,07 рад, а затем уменьшается. Перекос барабана заметно увеличивает сопротивление движению ленты. Увеличение энергопотребления при перекосе барабана в плоскостях *XY* и *XZ* почти одинаково. Для рассмотренного приводного барабана энергопотребление увеличилось на 4,8 % при перекосе барабана на 0,1 рад в плоскости *XY* или *XZ*. Проекция главного вектора F_x имеет меньшую величину при перекосе барабана в плоскости *XY* по сравнению с таким же перекосом в плоскости *XZ*. Это позволяет более плавно центрировать ленту поворотом барабана в плоскости *XY*. Центрирование ленты поворотом барабана в плоскости *XZ* сопровождается меньшими износом и потерями энергии на трение, так как обеспечивает требуемое силовое воздействие на ленту при меньшем угле перекоса, чем в плоскости *XY*.

Ключевые слова: конвейерная лента, барабан, перекос барабана, контакт ленты с барабаном, центрирование ленты, компьютерная модель.

Введение

Практика эксплуатации ленточных конвейеров показала, что одной из главных причин боковых смещений ленты являются перекосы барабанов относительно номинального положения [1–4]. Причинами перекосов барабанов являются погрешности монтажа, износ и деформации металлоконструкции при эксплуатации конвейера, выпучивание или проседание почвы. Повышенные боковые смещения ленты приводят к износу ее бортов и нижней обкладки. Известны случая возгорания ленты при длительном трении о стойки става. В [5] показано, что боковые смещения ленты сильно снижают производительность конвейера. Острые выступы керамических плиток футеровки барабана увеличивают износ нижней обкладки ленты при его перекосе [6].

Лента конвейера является ортотропной оболочкой сложной формы, движущейся под действием распределенных сил. В направлении оси *X*, совпадающей с осью правильно установленного барабана, для ленты нет кинематических ограничений, поэтому центральное положение ленты на ставе обеспечивают регулируемым силовым воздействием.

Боковые смещения ленты как оболочки никто не рассчитывал. Для расчетов используют упрощенные расчетные схемы, представляя ленту как растянутую нить или как растянутый стержень с нулевыми граничными условиями, соответствующими отсутствию боковых смещений на концевых барабанах [4]. Поскольку боковые смещения и перекосы ленты на концевых барабанах возможны, более точные граничные условия включают уравнения сил и моментов [7].

Большая изгибная жесткость ленты относительно вертикальной плоскости симметрии ленты *YZ* приводит к тому, что дискретные силы F_k, действующие на ленту в направлении оси *X*, вызывают ее незначительные локальные смещения, но обеспечивают центральное движение ленты, условием которого является равенство

$$\sum_k F_{kx} = 0, \tag{1}$$

где F_{kx} – проекция силы F_k на ось *X*.

Для устойчивости центрального движения ленты необходимо, чтобы проекции F_{kx} были направлены противоположно боковому смещению ленты U_x, например, имели вид

$$F_{kx} = -C_\delta U_x, \tag{2}$$

где C_δ – жесткость характеристики силы, Н/м.

Этим свойством обладают силы, создаваемые желобчатыми роликоопорами, специальными центрирующими устройствами, барабанами выпуклой формы. Цилиндрические барабаны не создают центрирующей силы (2).

* bgtu@yandex.ru
http://orcid.org/0000-0002-1703-6654.

Экспериментальные зависимости скорости осевого смещения ленты на приводном барабане от угла перекоса центрирующего ролика в горизонтальной плоскости при разных углах наклона приводного барабана определены в [8]. Показано, что использование бочкообразного барабана недостаточно в случаях возникновения эксплуатационных факторов, влияющих на децентрирование движения ленты, например, при неравномерной загрузке скипа, поэтому необходимо иметь специальные средства центрирования ленты в виде центрирующих роликов.

Поворот барабанов конвейера используют для выполнения условия (1) путем ручного регулирования. Критериями эффективности такого регулирования являются жесткость C_δ и мощность силы трения W_f на дуге охвата. Небольшая величина C_δ позволяет плавно центрировать ленту. Уменьшение W_f снижает износ ленты и барабана.

Трехбарабанная механическая модель для изучения боковых смещений и изгиба ленты описана в [9]. Целью исследования был выбор положений барабана и детектора края ленты для эффективного центрирования ленты и исключения неустойчивых боковых смещений.

В [10] отмечается, что центрирование конвейерной ленты на барабане вызвано изгибом ленты и ее неравномерным растяжением по ширине.

Общий случай взаимодействия ленты с барабаном, перекошенным в горизонтальной или вертикальной плоскостях, рассмотрен в [11].

В [12] анализ взаимодействия ленты с перекошенным барабаном показал, что при перекосе в вертикальной плоскости точки ленты движутся по винтовым линиям на поверхности барабана. При перекосе в горизонтальной плоскости точки ленты движутся по эллиптическим кривым на поверхности барабана. Суммарная проекция сил трения на ось барабана обозначена как боковая сила. Зависимости боковой силы от угла перекоса барабана в вертикальной и горизонтальной плоскостях получены из приближенного рассмотрения скольжения ленты на барабане. Эти зависимости могут быть использованы для оценки силы сопротивления движению ленты, износа ленты и барабана. Для расчета боковых смещений ленты они непригодны, так как для этого необходимо учитывать не силы трения ленты на барабане, а главный вектор сил контакта ленты с барабаном.

В [13] рассмотрено взаимодействие с перекошенным барабаном ленты, боковые смещения которой ограничены. Показано, что зона контакта ленты с барабаном содержит участки покоя и относительного скольжения ленты. На участке покоя скольжение ленты относительно барабана отсутствует, и контактные касательные напряжения, определяемые сдвигом обкладки и резинотканевых слоев ленты относительно барабана, создают силу трения покоя. На участке скольжения происходит относительное смещение контактирующих точек ленты и барабана и возникает сила трения скольжения.

В [14] рассмотрено движение ленты, охватывающей два барабана, при пересекающихся и скрещивающихся осях барабанов. Получены аналитические зависимости для вычисления смещения ленты, степени перекоса. Результаты вычислений подтверждены конечно-элементным расчетом.

Барабаны ленточных конвейеров являются ответственными тяжело нагруженными узлами. Современные подходы к их проектированию и производству рассмотрены в [15].

Аналитические зависимости движения ленты на перекошенном барабане

Рассмотрим барабан, центр которого совпадает с началом декартовой системы координат *XYZ*. Для простоты изложения примем, что ось *Z* направлена вертикально, а оси *X* и *Y* – горизонтально.

При совпадении оси барабана с осью *X* (рис. 1) точка начала контакта ленты с барабаном $A_н$ находится на одной вертикальной прямой с точкой окончания контакта ленты с барабаном $A_к$.

При перекосе барабана в плоскости *XZ*, т. е. при повороте вокруг продольной оси конвейера *Y* на угол γ_Y, относительное смещение ленты $U_в$, м, в направлении оси барабана имеет вид [13]

$$U_в = R \operatorname{tg} \gamma_Y \left(1 - \cos \frac{\zeta}{R}\right), \tag{3}$$

где ζ– криволинейная координата, направленная вдоль дуги охвата, начиная от точки набегания ленты на барабан (точка $A_н$); *R* – радиус барабана.

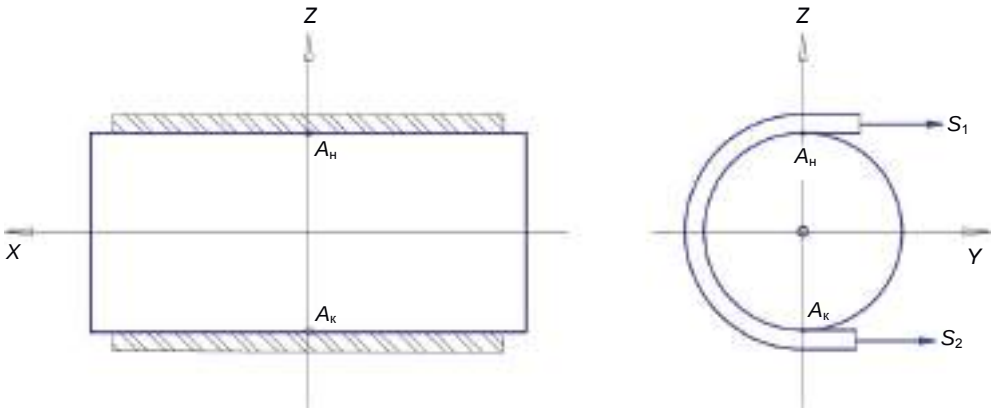


Рисунок 1. Схема огибания правильно установленного барабана лентой (S_1, S_2 – натяжения набегающей и сбегающей ветвей ленты).
Figure 1. Scheme of bending around a correctly installed pulley with a tape (S_1, S_2 – tension of the incoming and outgoing runs of the tape).

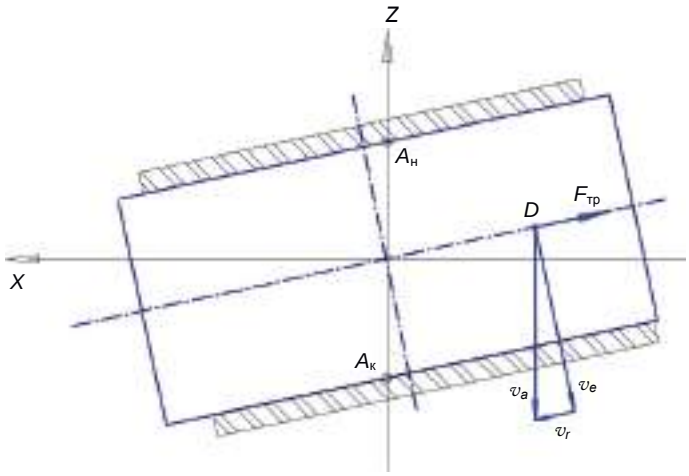


Рисунок 2. Схема расположения ленты на барабане, перекошенном в плоскости *XZ*. v_r – скорость скольжения ленты вдоль образующей барабана.
Figure 2. The layout of the tape on the pulley skewed in the XZ plane. v_r is the sliding speed of the tape along the element of the pulley.

На рис. 2 показа план скоростей точки *D* ленты, контактирующей с поверхностью барабана, перекошенного в плоскости *XZ*.

Абсолютная скорость точки ленты v_a складывается из переносной v_e и относительной v_r скоростей. Относительная скорость v_r – это скорость скольжения ленты вдоль образующей барабана. Векторы скоростей v_a v_e и v_r в момент времени, показанный на рис. 2, параллельны плоскости *XY*. Сила трения $F_{тр}$ направлена противоположно скорость v_r.

Продифференцировав (3), определим скорость относительного скольжения ленты в направлении оси барабана

$$v_r = v_e \operatorname{tg} \gamma_Y \sin \frac{\zeta}{R}. \tag{4}$$

Для неприводного барабана $v_e = \omega R$, где ω – угловая скорость вращения барабана.

Для приводного барабана $v_e = \omega R - v_\tau$, где v_τ – проекция скорости скольжения ленты на касательную к окружности барабана.

На первой части дуги охвата ($\zeta \leq \pi R$) скорость относительного скольжения ленты направлена вдоль образующей барабана в сторону опущенного края барабана, а сила трения $F_{тр}$ действует на ленту в направлении поднятого края барабана (рис. 2).

На второй части дуги охвата ($\zeta > \pi R$) скорость относительного скольжения и сила трения меняют направление.

При перекосе барабана в плоскости *XY*, т. е. при повороте вокруг оси *Z* на угол γ_Z, относительное смещение ленты $U_в$, м, в направлении оси барабана имеет вид

$$U_в = R \operatorname{tg} \gamma_Z \sin \frac{\zeta}{R}.$$

Максимальное относительное смещение ленты $U_в$, например, при $R = 0{,}4$ м и $\gamma_Z = 0{,}1$ рад достигает 40 мм.

На рис. 3 показан план скоростей точки ленты $A_н$ в момент начала контакта ленты с барабаном.

Скорость относительного скольжения ленты в направлении оси барабана определяется формулой

$$v_r = v_e \operatorname{tg} \gamma_Z \cos \frac{\zeta}{R}. \tag{5}$$

Лента на первой части дуги охвата ($\zeta \leq \pi R/2$) упруго смещается или скользит вдоль образующей барабана в сторону выдвинутого края барабана, а сила трения действует на ленту в направлении вдвинутого края барабана.

На второй части дуги охвата ($\pi R/2 < \zeta \leq 3\pi R/2$) скорость относительного скольжения ленты и сила трения меняют направление.

При одновременном перекосе барабана в плоскостях *XZ* и *XY*, т. е. при повороте вокруг осей *Y* и *Z*, скорость относительного скольжения ленты в направлении оси барабана определяется сложением формул (4) и (5).

На приводном неперекошенном барабане смещение ленты относительно барабана направлено по окружности. На приводном перекошенном барабане смещение ленты относительно барабана направлено по винтовой линии. На неприводном перекошенном барабане смещение ленты относительно барабана направлено почти вдоль образующей.

В [12] получены аналитические зависимости для проекций сил трения на ось барабана, в [13] – на ось барабана и ось *X*. При малых углах перекоса разница между проекциями на ось барабана и ось *X* незначительна, но с увеличением угла перекоса разница возрастает существенно.

Помимо проекций сил трения на ось барабана для расчета боковых смещений ленты требуется определить главный вектор сил контакта ленты с барабаном. Поскольку в каждой точке дуги охвата лентой барабана нормальная реакция *N* и сила трения $F_{тр}$ имеют разные направления, для определения главного вектора сил контакта необходимо проинтегрировать *N* и $F_{тр}$ по дуге охвата.

На центрирование ленты, согласно (1), влияет проекция F_x главного вектора сил контакта ленты с барабаном на ось *X*. Проекцию главного вектора сил контакта ленты с барабаном на ось барабана F_o используют для расчета осевой нагрузки подшипников барабана.

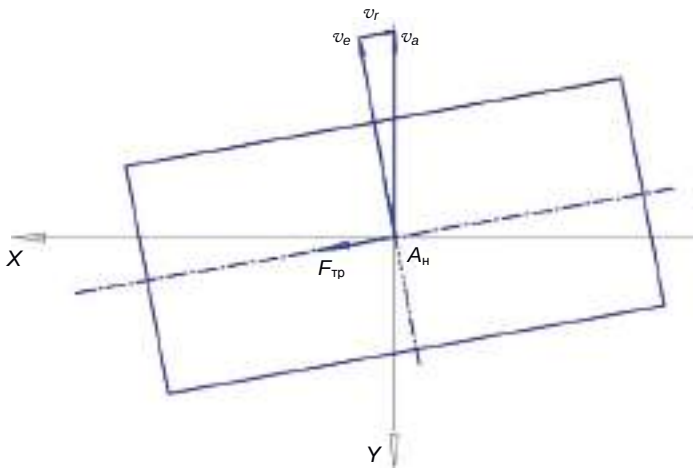


Рисунок 3. План скоростей ленты на барабане, перекошенном в плоскости *XY*. v_r – скорость скольжения ленты вдоль образующей барабана.
Figure 3. Tape velocity diagram on a pulley skewed in the XY plane. v_r is the sliding speed of the tape along the element of the pulley.

Указанные аналитические модели [9–15] не позволяют эффективно определять главный вектор сил контакта, исследовать движение ленты на перекошенном барабане конвейера с учетом инерционных и механических характеристик привода, вязко-упругих свойств ленты, различных зависимостей сопротивления движению ленты и нелинейного контактного взаимодействия. Сложности расчетам добавляет необходимость рассчитывать размеры участков относительного покоя и скольжения ленты на приводном барабане.

Метод проведения работы: компьютерное моделирование движения ленты на перекошенном барабане конвейера как многомассовой динамической системы с учетом механических характеристик привода, ленты и их контактного взаимодействия с использованием программного комплекса «Универсальный механизм».

Описание компьютерной модели движения ленты на перекошенном барабане

Эффективным инструментом исследования движения ленты на перекошенном барабане является компьютерное моделирование с использованием программных комплексов (ПК) «Универсальный механизм», Adams и др.

Разработанная модель включает приводной и тормозной барабаны одинакового радиуса, замкнутую ленту, представленную 36 телами ленты (ТЛ), соединенными упруго-диссипативными элементами. Изгибная жесткость ленты не учитывается. В модели ТЛ пронумерованы последовательно с № 1 до № 36.

Центр неподвижной прямоугольной системы координат совмещен с центром приводного барабана. Ось *Y* – продольная ось конвейера – проходит через середины осей вращения барабанов (рис. 4).

У горизонтального конвейера ось *Z* направлена вертикально вверх, а ось *X* – горизонтально. Ось *X* совпадает с осью вращения неперекошенного приводного барабана. Ось тормозного барабана соединена с грузовым натяжным устройством и может перемещаться вдоль оси *Y*.

Для создания перекоса приводного барабана в плоскости *XY* его ось вращения поворачивают относительно оси *Z*, а для создания перекоса в плоскости *YZ* – относительно оси *Y*. На рис. 4, б показан приводной барабан, перекошенный в плоскости *XY*.

Поперечное сечение ленты имеет большую изгибную жесткость относительно плоскости *YZ* из-за большого момента инерции относительно оси *Y*. Вследствие этого боковые смещения изгиба ленты в направлении оси *X* на ограниченной длине дуги охвата незначительны. Поэтому в модели принято, что боковые смещения ленты в направлении оси *X* отсутствуют.

Изменение растяжения по ширине ленты для конвейеров длиной более 100 единиц ширины ленты можно не учитывать.

Модель включает силу трения скольжения ползуна тормозного барабана по направляющей и упруго-диссипативную силу растяжения каната груза.

Контактное взаимодействие ленты с барабанами представлено контактными силами «точка–окружность», описанными в руководстве пользователя ПК «Универсальный механизм» [16].

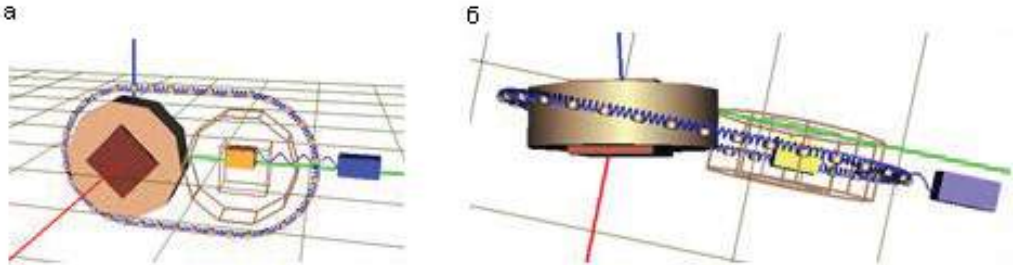


Рисунок 4. Модель замкнутой ленты, охватывающей приводной и тормозной барабаны, созданная в среде ПК «Универсальный механизм». а – вид сбоку; б – вид сверху.
Figure 4. Model of a closed tape covering the drive and brake pulley created in the "Universal Mechanism" PC environment. a is a side view; b - top view.

В случае скольжения сила трения $F_{тр}$ пропорциональна нормальной реакции N контактирующих тел и направлена против скорости скольжения.

$$F_{тр} = fN,$$

где f – коэффициент трения скольжения, величина которого зависит от скорости скольжения v_S.

Зависимость коэффициента f от величины v_S учитывает эффект Штрибека

$$f(v_S) = f_\infty + (f_0 - f_\infty)\exp(-v_S/v_{str})^\delta + \nu v_S,$$

где f_0, f_∞ – коэффициенты трения при нулевой скорости и при бесконечной скорости скольжения; v_{str} – скорость Штрибека, определяющая интервал скорости скольжения, на котором имеет место эффект экспоненциального падения коэффициента трения; $\delta \in [0{,}5; 1]$ – эмпирический показатель степени; ν – коэффициент вязкого трения.

Переход от трения скольжения к трению покоя происходит, если скорость скольжения меняет направление на противоположное. Величина силы трения покоя определяется коэффициентами контактной жесткости C_n и контактной диссипации C_d.

При асинхронном электроприводе крутящий момент приводного барабана представим зависимостью

$$M_1 = \frac{M_{nom}}{\varepsilon_k}\left(1 - \frac{\omega_1 I}{\omega_s}\right), \tag{6}$$

где M_{nom} – номинальный крутящий момент приводного барабана, ε_k – номинальное электромеханическое скольжение электродвигателя (ЭД); ω_1 – угловая скорость приводного барабана; ω_s – синхронная угловая скорость ЭД; I – передаточное отношение привода.

Линейная зависимость (6) хорошо подходит для установившегося режима работы асинхронного ЭД.

Сопротивление движению конвейерной ленты реализовано с помощью тормозного барабана. Момент тормозного барабана представлен зависимостью

$$M_2 = M_{C0} + M_{C1}\omega_2,$$

где M_{C0}, M_{C1} – коэффициенты сопротивления вращению тормозного барабана, ω_2 – угловая скорость тормозного барабана.

Уменьшение значений M_{nom}, M_{C0} и M_{C1} до величин около $(0{,}01\ldots0{,}001)S_1R$ позволяет моделировать движение ленты на перекошенном неприводном барабане.

Результаты моделирования

С использованием компьютерной модели проведено моделирование установившегося движения ленты на перекошенном приводном барабане конвейера со следующими параметрами: масса ленты $\rho = 16$ кг/м; длина ленты, представляемая одним дискретным телом ленты (ТЛ), $l_0 = 0{,}1$ м; жесткость упруго-диссипативного элемента $C_1 = 6$ МН; коэффициент диссипации упруго-диссипативного элемента $\mu_1 = 5{,}6$ кН · с/м; $\omega_s = 5{,}2$ рад/с; $\varepsilon_k = 0{,}04$; $M_{nom} = 5000$ Н · м; $M_{C0} = 2500$ Н · м; $M_{C1} = 500$ Н · м · с/рад; $R = 0{,}4$ м; угол охвата $\alpha_o = \pi$ рад, $f_0 = f_\infty = 0{,}25$; коэффициент контактной жесткости $C_n = 1{,}0$ МН/м; коэффициент контактной диссипации $C_d = 500$ Н · с/м; $\nu = 0$; масса груза натяжного устройства $M_{н.у} = 5000$ кг, сила трения скольжения ползуна тормозного барабана $F_{н.у} = 192$ Н.

На рис. 5 приведены графики проекций сил трения ТЛ № 6–17 на ось X при перекосе барабана в плоскости XY на 0,05 рад. На рис. 5, 6 по оси абсцисс указано время (с), по оси ординат указана величина проекции силы трения (Н).

Из графиков рис. 5 видно, что проекции сил трения ТЛ на ось X меняют знак при переходе ТЛ на вторую половину дуги охвата ($\zeta > \pi R/2$). Величины проекций сил трения ТЛ на второй половине дуги охвата меньше, чем на первой, из-за уменьшения силы растяжения ленты. Поворот неприводного барабана вокруг оси Z создает значительную по величине проекцию $F_x = -5{,}93$ кН главного вектора сил контакта ленты с барабаном на ось X.

На неприводном барабане сила растяжения ленты изменяется несущественно, и сумма проекций сил трения ТЛ на ось X близка к нулю при $\alpha_o = \pi$. Тем не менее поворот неприводного барабана вокруг оси Z также создает значительную по величине проекцию главного вектора сил контакта ленты с барабаном на ось X за счет силы растяжения ленты.

На рис. 6 приведены графики проекций сил трения ТЛ № 6–17 на ось X при перекосе барабана в плоскости XZ на 0,05 рад.

Из графиков рис. 6 видно, что ТЛ немонотонно скользят относительно барабана на дуге охвата. В моменты входа ТЛ в контакт с барабаном и выхода из контакта возникают небольшие по величине осцилляции контактных сил и перемещений. Все ТЛ, контактирующие с барабаном, меняют направление скольжения в начале и конце дуги охвата.

Поворот неприводного барабана вокруг оси Y создает большую по величине проекцию главного вектора сил контакта ленты с барабаном на ось X ($F_x = -12{,}88$ кН), чем поворот вокруг оси Z.

На рис. 7, 8 показаны зависимости проекций F_x главного вектора сил контакта ленты с барабаном на ось X и на ось барабана F_o от угла перекоса приводного барабана в плоскостях XY и YZ. По оси абсцисс указан угол перекоса (рад), по оси ординат указана величина проекций F_x и F_o (кН).

Проекции главного вектора F_x и F_o достигают максимального значения при перекосе барабана в плоскости XZ на угол 0,05–0,07 рад (2,8°–4,0°), а при больших углах незначительно уменьшаются.

При перекосе барабана в плоскости XY на угол до 0,2 рад проекция F_x возрастает нелинейно с локальным максимумом, соответствующим углу 0,05 рад. Проекция главного вектора F_o достигает максимального значения при перекосе барабана в плоскости XY на угол 0,05–0,07 рад, а затем уменьшается.

Поворот барабана в плоскости XY позволяет более плавно центрировать ленту по сравнению с таким же поворотом в плоскости XZ.

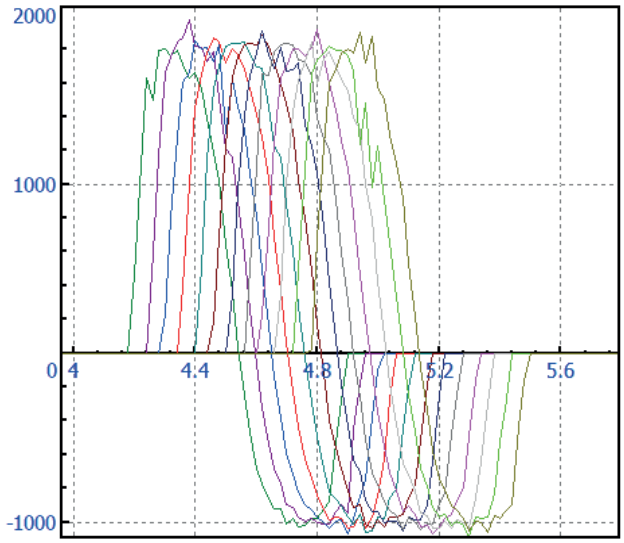


Рисунок 5. Проекции сил трения ТЛ № 6–17 на ось *X* при перекосе барабана в плоскости *XY* на 0,05 рад.
Figure 5. The projection of the friction forces of the TL No. 6-17 on the X axis when the pulley is skewed in the XY plane by 0.05 rad.

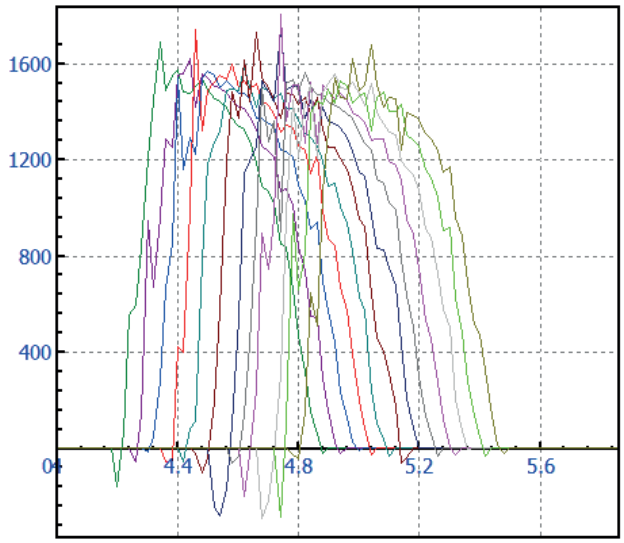


Рисунок 6. Проекции сил трения ТЛ № 6–17 на ось *X* при перекосе барабана в плоскости *XZ* на 0,05 рад.
Figure 6. Projections of the friction forces of the TL No. 6–17 on the X axis when the pulley is skewed in the XZ plane by 0.05 rad.

Для указанных исходных данных при углах перекоса барабана менее 0,005 рад проекция F_o составляет менее 11 % радиальной нагрузки на барабан ($S_1 + S_2$).

Мощность силы трения W_f на дуге охвата определим как разницу мощностей, реализуемых приводным барабаном при перекосе и без перекоса. Для заданных параметров модели величина W_f при перекосе барабана в плоскостях *XY* и *XZ* на одинаковые углы отличается не более чем на 1 %. Перекос барабана в плоскости *XY* или *YZ* на 0,1 рад увеличивает энергопотребление на 4,8 %, а перекос на 0,2 рад – на 8 %.

Определение мощности силы трения важно для оценки износа и температуры ленты и барабана.

Поворот барабана в плоскости *XZ* для центрирования ленты сопровождается меньшим износом ленты и энергозатратами на трение, так как обеспечивает требуемое силовое воздействие на ленту при меньшем угле перекоса, чем в плоскости *XY*.

Результаты работы и область их применения

Разработана компьютерная многомассовая динамическая модель движения ленты на перекошенном барабане конвейера, позволяющая более точно определять параметры силового и кинематического взаимодействия ленты с приводным и неприводным барабанами по сравнению с известными аналитическими моделями. Компьютерная модель учитывает механические характеристики привода, ленты и их контактного взаимодействия.

Компьютерную модель и установленные закономерности движения ленты на перекошенном барабане конвейера целесообразно использовать при проектировании ленточных конвейеров горных предприятий.

Выводы

Проекция F_x главного вектора сил контакта ленты с барабаном на ось *X* является оценкой центрирующего воздействия барабана на ленту. Проекция главного вектора сил контакта ленты с барабаном на ось барабана F_o определяет осевую нагрузку подшипников барабана.

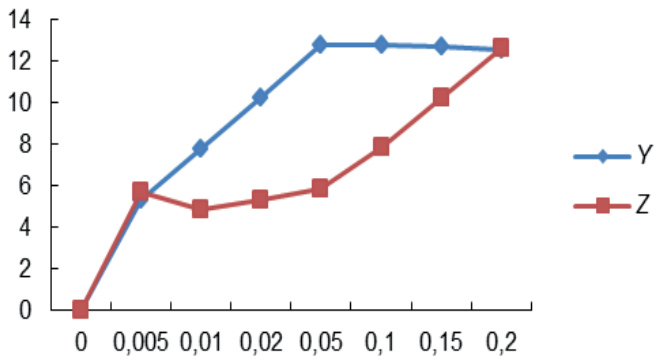


Рисунок 7. Графики проекции F_x, кН, при повороте приводного барабана относительно осей *Y* и *Z*.
Figure 7. Projection graphs Fx, kN, when the drive pulley rotates relative to the Y and Z axes.

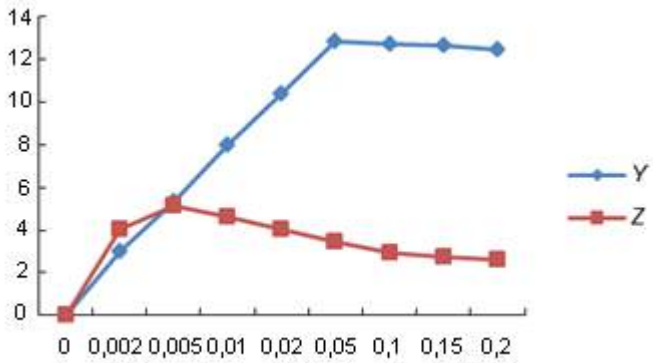


Рисунок 8. Графики проекций F_o, кН, при повороте приводного барабана относительно осей *Y* и *Z*.
Figure 8. Graphs of projections Fo, kN, when the drive pulley rotates relative to the Y and Z axes.

Проекции главного вектора F_x и F_o достигают максимального значения при перекосе барабана в плоскости *XZ* на угол 0,05–0,07 рад, а затем незначительно уменьшаются. При перекосе барабана в плоскости *XY* на угол до 0,2 рад проекция F_x возрастает нелинейно. Проекция F_o достигает максимального значения при перекосе барабана в плоскости *XY* на угол 0,05–0,07 рад, а затем уменьшается.

Перекос барабана в плоскостях *XY* и *XZ* заметно увеличивает сопротивление движению ленты. Увеличение энергопотребления при перекосе барабана в плоскостях *XY* и *XZ* почти одинаково. Для рассмотренного приводного барабана энергопотребление увеличилось на 4,8 % при перекосе барабана на 0,1 рад в плоскости *XY* или *XZ*.

Проекция главного вектора F_x имеет меньшую величину при перекосе барабана в плоскости *XY* по сравнению с таким же перекосом в плоскости *XZ*. Это позволяет более плавно центрировать ленту поворотом барабана в плоскости *XY*.

Центрирование ленты поворотом барабана в плоскости *XZ* сопровождается меньшими износом и потерями энергии на трение, так как обеспечивает требуемое силовое воздействие на ленту при меньшем угле перекоса, чем в плоскости *XY*.

ЛИТЕРАТУРА

1. Биличенко Н. Я., Высочин Е. М., Завгородний Е. Х. Эксплуатационные режимы ленточных конвейеров. Киев: ГИТЛ, 1964. 263 с.
2. Egger M., Hoffmann K. Lateral running behaviour of conveyor belts // Bulk Solids Handling. 2001. Vol. 21, issue 3. P. 301–306.
3. Egger M., Hoffmann K. Tracking of Flat Belts // Journal of Mechanics Engineering and Automation. 2012. Vol. 2 (1–2), Serial Number 7. P. 27–36.
4. Шахмейстер Л. Г., Дмитриев В. Г. Теория и расчет ленточных конвейеров. М.: Машиностроение, 1978. 385 с.
5. Fazekas G. A. G. On the lateral creep of flat belts // Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME. 1963. Vol. 85, issue 3. P. 307–310.
6. Zhang Y. Destruction of belt bottom covers: Conveyor belt bottom cover failure from Idlers and Pulleys // Bulk Solids Handling. 2016. Vol. 36, issue 6. P. 16–21.
7. Дмитриев В. Г., Реутов А. А. Исследование боковых смещений ленты порожняковой ветви конвейера, оборудованной центрирующими роликоопорами // Изв. вузов. Горный журнал. 1981. № 9. С. 64–67.
8. Зотов В. В. Методы устранения смещения ленточного тягового органа на приводном барабане подъемной установки // ГИАБ. 2006. № 11. С. 269–275.
9. Egger M., Pirko A., Hoffmann K. Simulation of flat belt running // Steel Research International. 2007. Vol. 78, issue 4. P. 364–368.
10. Kribitz G. A. A descriptive explanation of the belt tracking properties of pulleys by using the geometric properties of the flat pattern of their surface // Bulk Solids Handling. 2016. Vol. 36, issue 4. P. 44–50.
11. Белостоцкий Б. Х. Анализ поперечного движения ленты на барабане // Шахтный и карьерный транспорт. М.: Недра, 1974. Вып. 6. С. 116–121.
12. Дьяков В. А., Шахмейстер Л. Г., Дмитриев В. Г. Ленточные конвейеры в горной промышленности. М.: Недра, 1982. С. 254–263.
13. Реутов А. А. Моделирование приводов ленточных конвейеров. Брянск: БГТУ, 2011. С. 131–134.
14. Zhang W. Analysis on skew of flat belts in two-pulley drives // Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME. 2011. Vol. 133, issue 11. Article number 111001. https://doi.org/10.1115/1.4004982
15. Helten S., Miketta A. Design, engineering and manufacturing of heavy-duty conveyor-belt pulleys [Auslegung, Konstruktion und Fertigung hochbeanspruchter Fdrdergurttrommeln] // World of Mining – Surface and Underground. 2018. № 70(2). P. 114–119.
16. Программа ввода данных. Руководство пользователя. URL: http://www.universalmechanism.com/download/80/rus/03_um_data_input_program.pdf

Статья поступила в редакцию 06 ноября 2018 г.

УДК 621.867.2 https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-3-133-140

Modelling the interaction of the belt with the out-of-line pulley of the conveyor

Aleksandr Alekseevich REUTOV*

Bryansk State Technical University, Russia, Bryansk

Relevance of research. The operation of belt conveyors shows that the distortions of the pulleys relative to the nominal position are one of the main reasons for the intensive wear of the belt, spilling of cargo, and increased energy consumption. There are known cases of fire of the tape during prolonged friction.
Purpose: to establish the patterns of belt movement on an out-of-line conveyor pulley, to determine the parameters of power and kinematic interaction of the belt with drive and non-drive pulleys, taking into account the mechanical characteristics of the drive, belt and their contact interaction.
Method of work: computer simulation of belt movement on an out-of-line conveyor pulley as a multi-mass dynamic system, taking into account the mechanical characteristics of the drive, belt and their contact interaction using the Universal Mechanism software package.
Results of work and their scope. A computer-based multi-mass dynamic model of belt movement on an out-of-line conveyor pulley has been developed, which allows more accurately determining the parameters of the force and kinematic interaction of the belt with drive and non-drive pulleys in comparison with well-known analytical models. The computer model takes into account the mechanical characteristics of the drive, tape and their contact interaction. It is advisable to use a computer model and established patterns of belt movement on an out-of-line conveyor pulley when designing conveyor belts of mining enterprises.
Conclusions. It was found that the projection Fx of the main vector of the forces of contact of the tape with the pulley on the X axis is an estimate of the centering action of the pulley on the tape. The projection Fo of the main vector of the contact forces of the tape with the pulley on the pulley axis determines the axial load of the pulley bearings. The projections of the main vector Fx and Фо reach their maximum value when the pulley is out-of-line in the XZ plane by an angle of 0.05–0.07 rad, and then slightly decreases. When the pulley is skewed in the XY plane by an angle of up to 0.2 rad, the projection Fx increases nonlinearly. The projection Fo reaches its maximum value when the pulley is skewed in the XY plane by an angle of 0.05–0.07 rad, and then decreases. Skewing the pulley significantly increases the resistance to movement of the tape. The increase in energy consumption when the pulley is skewed in the XY and XZ planes is almost the same. For the drive pulley under consideration, energy consumption increased by 4.8% when the pulley was skewed by 0.1 rad in the XY or XZ plane. The projection of the main vector Fx is smaller when the pulley is skewed in the XY plane compared to the same out-of-line in the XZ plane. This allows you to more smoothly center the tape by turning the pulley in the XY plane. Centering the tape by turning the pulley in the XZ plane is accompanied by less wear and friction energy loss, as it provides the required force on the tape with a smaller angle of skew than in the XY plane.

Keywords: conveyor belt, pulley, out-of-line of a pulley, contact of a belt with the pulley, centering of the belt, computer model.

REFERENCES

1. Bilichenko N. Ya., Vysochin Ye. M., Zavgorodniy Ye. Kh. 1964, *Ekspluatatsionnyye rezhimy lentochnykh konveyyerov* [Operating modes of belt conveyors]. Kiev, 263 p.
2. Egger M., Hoffmann K. 2001, Lateral running behaviour of conveyor belts. Bulk Solids Handling, vol. 21, issue 3, pp. 301–306.
3. Egger M., Hoffmann K. 2012, Tracking of Flat Belts. *Journal of Mechanics Engineering and Automation,* vol. 2 (1–2), Serial Number 7, pp. 27–36.
4. Shakhmeyster L. G., Dmitriyev V. G. 1978, *Teoriya i raschet lentochnykh konveyyerov* [Theory and calculation of belt conveyors]. Moscow, 385 p.
5. Fazekas G. A. G. 1963, On the lateral creep of flat belts. *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, vol. 85, issue 3, pp. 307–310.
6. Zhang Y. 2016, Destruction of belt bottom covers: Conveyor belt bottom cover failure from Idlers and Pulleys. *Bulk Solids Handling*, vol. 36, issue 6, pp. 16–21.
7. Dmitriev V. G., Reutov A. A. 1981, Investigation of lateral displacements of the belt of the empty branch of the conveyor equipped with centering roller bearings. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal [*News of the Higher Institutions. Mining Journal], no. 9, pp. 64–67. (*In Russ.*)
8. Zotov V. V. 2006, Methods of eliminating displacements of the tape traction body on the drive pulley of the lifting installation. *Gorny Informatsionno-Analiticheskiy Byulleten (nauchno-teknicheskii zhurnal)* [Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)], no. 11, pp. 269–275. (*In Russ.*)
9. Egger M., Pirko A., Hoffmann K. 2007, Simulation of flat belt running. *Steel Research International*, vol. 78, issue 4, pp. 364–368.
10. Kribitz G. A. 2016, A descriptive explanation of the belt tracking properties of pulleys by using the geometric properties of the flat pattern of their surface. *Bulk Solids Handling*, vol. 36, issue 4, pp. 44–50.
11. Belostotskiy B. Kh. 1974, *Analiz poperechnogo dvizheniya lenty na barabane* [Analysis of the transverse movement of the tape on the pulley]. *Mine and quarry transport*. Moscow, issue 6, pp. 116–121.
12. D'yakov V. A., Shakhmeyster L. G., Dmitriyev V. G. 1982, *Lentochnyye konveyyery v gornoy promyshlennosti* [Belt conveyors in the mining industry]. Moscow, pp. 254–263.
13. Reutov A. A. 2011*, Modelirovaniye privodov lentochnykh konveyyerov* [Modeling of conveyor belt drives]. Bryansk, pp. 131–134.
14. Zhang W. 2011, Analysis on skew of flat belts in two-pulley drives. *Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME*, vol. 133, issue 11, article number 111001. https://doi.org/10.1115/1.4004982
15. Helten S., Miketta A. 2018, Design, engineering and manufacturing of heavy-duty conveyor-belt pulleys [Auslegung, Konstruktion und Fertigung hochbeanspruchter Fdrdergurttrommeln]. World of Mining – Surface and Underground, no. 70(2), pp. 114–119.

The article was received on November 06, 2018

* bgtu@yandex.ru
http://orcid.org/0000-0002-1703-6654.

Экономические науки
Economic sciences

УДК 338.2 https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-3-141-149

The methodological approach to determining the environmental and economic efficiency of processing of man-made mineral formations

Ol'ga Aleksandrovna ROMANOVA*,
Dmitriy Vladimirovich SIROTIN**

Institute of Economics of the Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russia

Relevance. The importance of ensuring environmental safety makes actual the development of environmental measures in the mining and metals sector. The processing of man-made mineral formations is essential in solving this problem. At the same time, the role of ferroalloy industry wastes plays a great role in the overall structure of technogenic resources, the processing of which is largely determined by improving the development of technological potential of the industry.
The purpose of the work is to develop a methodological approach to determining the environmental and economic efficiency of processing of man-made mineral formations.
Results. This paper systematizes the basic technologies for producing man-made products based on slags of ferroalloy industry. The volumes of formation of ferroalloy slag, dust, and sludge in Russia are specified. There was a decrease in industrial waste of various classes of hazard within the territory of the Sverdlovsk region, including slag from ferroalloy industry as a result of their partial processing. This paper notes the need to develop a methodological approach to assessing the environmental and economic efficiency of involving ferroalloy industry in waste production taking into account the assessment of the strategic flexibility of technological decisions made. Within the framework of this task, the main approaches are presented and systematic indicators for assessing the economic efficiency of waste recucling taking into account the environmental factor are presented. A scheme is presented that reflects the main stages of implementation of the methodological approach for assessing the environmental and economic efficiency of processing of man-made mineral formations of ferroalloy industry including strategic flexibility. The relevance of applying the real options methodology is justified; the feasibility of calculating the proposed real options using the Black-Scholes model is emphasized. The classification of possible options in the field of processing ferroalloy industry wastes is developed; a general view of the binary event tree for projects in this area is given.
Conclusions. The proposed provisions of the author's methodological approach allowed forming a methodological toolkit for assessing the environmental and economic efficiency of waste of mining and smelting industry, which can be successfully used in practice.

Keywords: ferroalloy industry, waste, man-made mineral formations, "dome products", performance evaluation, real options, the best available technologies.

Introduction

The problem of pollution of the atmosphere and water bodies with harmful substances, land occupation by industrial waste is one of the most urgent issues today. The main source of environmental complications in Russia is the mining sector, including the production of energy resources, chemical and metallurgical production, extraction and processing of natural resources, etc. Within the framework of metallurgical production, the main sources of environmental pollution include ferroalloy industry along with non-ferrous metallurgy. The level of development of ferroalloy industry determines the qualitative development of metallurgy as a whole. Globally, about 40 million tons of ferroalloys are produced per year today. In Russia, the annual production of ferroalloys is more than 1.73 million tons [1], while the share of the Urals is more than 53% (Fig. 1).

It should be noted that there are discrepancies in the volumes of ferroalloys produced in the Russian Federation in the review materials and statistical books. Thus, according to the Federal State Statistics Service, in 2018, the melting volumes of ferroalloys in Russia were estimated at 2.1 million tons (Table 1). The structure of production of the main ferroalloys in the Urals Federal District and Russia as a whole is quite diverse. Large-capacity ferroalloys include ferro- and silicomanganese, ferrochrome, ferrosilicon. Ferroalloys of the small-capacity group are necessary for the development of special metallurgy. These include alloys based on vanadium, molybdenum, niobium, titanium, nickel, etc.

In the Sverdlovsk region, the structure of ferroalloy industry also includes ferroalloys of large and small-capacity groups (Table 2).

The mineral raw material base is characterized by limitedness, which often acts as a deterrent when design planning of production. At the same time, it is advisable to adopt a resource-saving policy, within which a special role is given to the use of man-made mineral formations. The involvement of man-made resources in production is becoming one of the most promising directions for the development of ferroalloy industry. Such waste acts as a new source of raw materials, and in addition, its processing can reduce the burden on the environment. This direction of technological development not only expands the raw material base but is also the first step towards the formation of a closed-loop economy [2].

The Ecology national project approved by the Presidium of the Presidential Council for strategic development and national projects (Minutes No. 16 of December 24, 2018) has 11 Federal projects, including the implementation of the Best Available Technologies (BAT) project. This project provides preparation industry-specific methods for assessing the costs of transitioning to BAT principles at the end of the year 2022. Until 2023, it is expected to create a production base (taking into account the constructed and reconstructed equipment) of environmental engineering. Over the next year, this production base should be sup-

* econ@uran.ru
http://orcid.org/0000-0002-6459-881X
** sirotind.umk@mail.ru
http://orcid.org/0000-0002-3794-3956

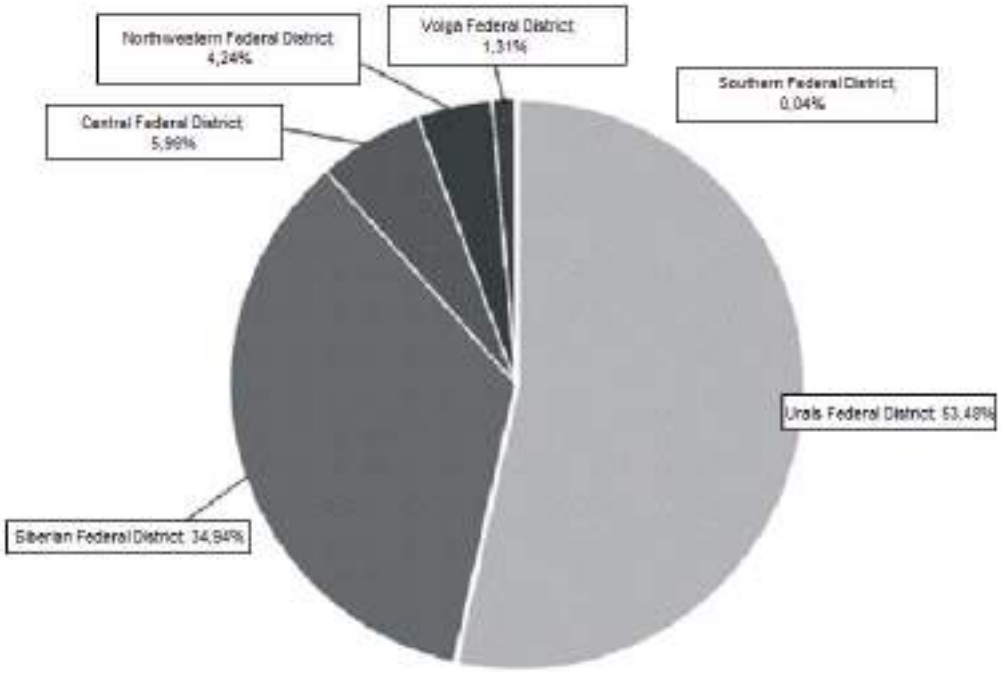


Figure 1. Shares of federal districts (FD) in the production of ferroalloys in Russia in January – February 2018, %[1]. *According to some analysts who study markets for raw materials, metals and metal products International Metallurgical Research Group.*
Рисунок 1. Доли федеральных округов (ФО) в производстве ферросплавов в России в январе–феврале 2018 г., %[1]. *По данным группы аналитиков по изучению рынков сырья, металлов и продукции из них «International Metallurgical Research Group».*

Table 1. Production of main products in physical terms, tons.
Таблица 1. Производство основных видов продукции в натуральном выражении, т.

Product	Year					
	2017	2018	2019			
	January-December	January-December	January	February	March	April
	Administrative-territorial facility (Russian Administrative-Territorial Division Classification)					
	Russian Federation					
Ferroalloys	2 024 000	2 112 490.00	184 420.00	170 530.0	187,830.0	179 530.0
Including:						
ferrosilicium	840 765	932 068.55	78 965.95	72 056.8	75 466.5	67 258.3
silicomanganese	52 095	48 396.00	4347.00	3875.0	4037.0	4167.0
ferromolybdenum	4856	3072.16	364.00	397.0	386.0	418.0
ferrovanadium	12 588	11 313.75	864.15	962.5	997.0	940.5
vanadium oxide	56 917	53 738.00	4931.00	4265.3	4831.9	3838.8
ferrochrome	436.280	337 390.58	34 612.30	30 215.9	35 676.4	32 779.7
ferrochrome silicon	80 923	89 997.00	7835.00	7208.0	8117.0	7294.0
ferrosilicon manganese	292 000	305 000.00	22 800.00	22 400.0	23 700.0	27 200.0
ferromanganese	167 000	262 200.00	22 000.00	20 200.0	27 600.0	28 900.0
	Ural Federal district					
Ferroalloys	1 155 000	1 113 290.00	101 340.00	92 120.0	99 320.0	92 540.0
Including:						
ferrosilicium	202,769	236 471.35	19 273.75	17 481.4	17 224.9	12 143.1
ferrovanadium	147	144.75	17.15	21.5	8.0	23.5
vanadium oxide	45 402	42 290.00	3860.00	3398.3	3768.9	3173.8
ferrochrome	359 542	255 984.58	29 022.30	24 358.9	29 243.4	27 120.7
ferrochrome silicon	80 923	89 997.00	7835.00	7208.0	8117.0	7294.0
ferrosilicon manganese	292 000	305 000.00	22 800.00	22 400.0	23 700.0	27200.0
ferromanganese	104 000	127 300.00	11 200.00	8700.0	10 600.0	9100.0

According to the Federal state statistics service.
По данным Федеральной службы государственной статистики.

[1] The share of the Southern Federal District in the analyzed period was 0.04%, which did not allow reflecting it on the diagram.
Доля Южного ФО в анализируемый период составляла 0,04 %, что не позволило отразить её на диаграмме.

Table 2. Change in production volumes of the main ferroalloys in the Sverdlovsk region,%.
Таблица 2. Изменение объемов производства основных ферросплавов в Свердловской области, %.

Product	2014 by 2013	2015 by 2014	2016 by 2015	2017 by 2016
Ferrosilicium	86.9	61.7	17.4	By 4.2 times
Ferrochrome silicon tradeable	124.7	By 1.6 times	70.0	111.3
Low-carbon ferrochrome	90.9	73.7	129.9	147.4
High-carbon ferrochrome	103.4	61.0	87.5	
Metal chrome	113.9	100.8	115.6	N/a
Vanadium oxide, tradable	103.9	107.1	104.3	108.4
Ferrotitanium	140.3	94.5	141.2	110.3
Ferroboron	103.9	89.3	36.6	By 1.7 times

According to the statistical books of Sverdlovskstat: «Sverdlovsk region: production of main types of products " for 2015–2018.
По данным статистических сборников Свердловскстат: «Свердловская область: производство основных видов продукции» за 2015–2018 гг.

plemented by the commissioning of instrumentation engineering. Moreover, within the framework of the project, it is planned to update 51 information and technical reference books on BAT by 2024. For these purposes, from 2019 to 2024, 27.3 billion rubles will be allocated from the federal budget and 2400 billion rubles from non-government sources.

The processing base for the development of the closed-loop economy in the metallurgical industry takes into account such areas as recycling of blast-furnace gas, the use of pulverized coal fuel, and refocusing to the use of coal-ore briquettes in both blast-furnace process and steel industry. The development of these areas will reduce the volume of harmful emissions into the atmosphere by an average of 60%, reduce the cost of metal products by more than 25%. At the same time, the carbon footprint from ferrous metallurgy enterprises should be reduced by 2–3 times [3]. The philosophy of the closed-loop economy takes into account the formation of the market for "dome products"[1].

The main man-made resources of ferroalloy industry include slags, sludges, screenings of crude ore and ferroalloys. About 30% of ferroalloy slag is processed. They are mainly used for the production of materials used in construction, including crushed stone (carbon ferrochrome), the production of mineral fertilizers (from the finely-ground ferroalloy), and in steelmaking. For example, slags from the aluminothermic production of ferroalloys are used as raw materials in the production of aluminous cement and ultrahigh early-strength cement; slag from production of ferrochrome is used for deoxidation and alloying of steel [4]. For direct alloying of steel, slag of high-carbon ferromanganese and metallic manganese are also used. Slag powders are used for liming acidic soils, household chemicals, and materials of construction [5]. There is almost no accounting for slag, sludge, and dust from enterprises of ferroalloy industry which makes their quantitative assessment difficult. Nevertheless, on the basis of the known values of smelting of ferroalloys, data on the slag rate and the calculation of the specific amount of dust and sludge per 1 ton of ferroalloy, the volumes of formation of ferroalloy slag can be identified. For example, at the Institute of Metallurgy of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, the calculation of volumes of formation of ferroalloy slags, dust and sludges within the framework of the domestic ferroalloy complex was performed (Tables 3, 4).

Dust and sludge belong to a higher class of hazard than slag in general; their collection is also much more difficult, which leads to additional energy and labor costs.

Table 3. Volumes of formation of ferroalloy slag in the Russian Federation for 2017, tons/year.
Таблица 3. Объемы образования ферросплавных шлаков в РФ за 2017 год, т/год.

Type of alloy	Volume of ferroalloys production, th.t	Slag ratio (average)	The mass of slag, th.t
Siliceous alloys	839	0.1	84
Chromium alloys	436	1.0	436
Silicomanganese	291	1.2	349
Ferromanganese	167	1.4	233
Total	1733	–	1102

According to the Ural Department of Economics of the Russian Academy of Sciences.
По данным Института экономики УрО РАН.

Table 4. Volumes of dust and sludge formation in the Russian Federation for 2017.
Таблица 4. Объемы образования пыли и шламов в РФ за 2017 год.

Type of alloy	Production volume, thousand tons/year	Air slack		Sludges		Total, thousand tons/ year
		Output, kg/ton	Mass, thousand tons	Output, kg/ton	Weight, thousand tons	
Silicon	839	120	100.7	N/a	N/a	100.7
Chrome	436	150	65.0	N/a	N/a	65.0
Manganese	458	10	4.6	100	45.8	50.4
Total	1733	–	170.3	–	–	216.1

According to the Ural Department of Economics of the Russian Academy of Sciences.
По данным Института экономики УрО РАН.

[1]"Dome products" are production wastes generated at one enterprise; they can serve as a factor in production at another enterprise.

The main waste from ferroalloy industry is slag. In Russia, the annual volume of formation of such slags is more than 1100 thousand tons/year. Technologies for producing "domed" products based on ferroalloy slags take into account:

1. The proposed methods and units used to separate metal shots (given their weak magnetic properties):

– an x-ray radiometric method for the separation of slags from aluminothermic production (reduction) is used at the Klyuchevsk ferroalloy plant;

– Ukraine uses the pneumatic separation method (Nikopol Ferroalloy Plant);

– the use of jigging chambers, classifiers, as well as some special units.

2. The use of ferrosilicon slag as a flux for the production of high-carbon ferrochrome or charge-chromium (52–55% Cr) in ore-reducing electric furnaces.

3. Methods and units for the use of small fractions of ferroalloys from ladle slag, "cakes" and dump slag.

4. The use of boron-containing materials for the processing of slag of low-carbon ferrochrome having self-levelling properties.

5. The use of manganese varnishes in the production of slag stone products.

6. Technologies associated with the use of wastes from enrichment of chromium and manganese ore, which in their chemical composition are not inferior to man-made wastes of ferroalloy industry.

According to the data for the end of 2017, the volume of accumulated waste in the Sverdlovsk region amounted to 9.37 billion tons, which is almost 75 million tons more than in the previous year. At the same time, the share of commercial-grade waste in the total waste in 2017 amounted to 99.2% (9.291 billion tons). There was a decrease in the volume of production waste from 194.2 to 166.9 million tons within the territory of the region for the period from 2013 to 2017 (waste of classes of hazard I – IV was estimated at 6.25 million tons (3.7%), which is 11.4% less than in 2016 [6].) The main reason for the decrease in the generation of waste from these classes is their partial processing. First of all, these are slags of ferroalloy industry, slags of steel, copper, and copper concentrates, coke, etc. Enterprises that process production wastes have received expert opinions on the compliance of the products with state Sanitary-Epidemiological Requirements and Rules; they have also developed the necessary technical conditions.

Today for the development of ferrous metallurgy in the Sverdlovsk region, the rational use of additional sources of expanding the raw material base of industrial enterprises is of paramount importance. The efficiency of metallurgical production largely depends on the complexity of processing mineral raw materials. Since the creation of the most promising, large-scale mining and metallurgical complexes is costly, the search for alternative ways of obtaining raw materials for steelmaking and ferroalloy production remains a live issue today. Based on the assessment of the raw materials available in the Urals, ores can be considered scarce; the main elements include manganese, boron, niobium, molybdenum, copper, etc. Today in the Urals, a fairly large market of man-made raw materials has formed. However, only a small part of it is used as raw material for further processing. Nevertheless, we can talk about the presence of successful experience in processing these resources in the region.

Results

Ecological and economic efficiency of processing of man-made mineral formations of the ferroalloy industry. The solution to the problem of reducing waste from ferroalloy industry is possible through the implementation of areas such as reducing their quantity due to the development of production technologies; minimization of waste release into the environment as a result of increased measures for their collection; processing of formations into technogenic products. Today there are no technologies of completely non-waste production in metallurgy. The use of accumulated waste as man-made raw materials contributes to maximizing the saving of natural resources and improving the environmental situation, as well as dumps clearance [7]. To make a decision on the use of technogenic products in one direction or another, a system of criteria is necessary that takes into account their chemical and mineral composition, environmental characteristics, and reactivity. Depending on the type of ferroalloy and the application of slag, the processing of waste from ferroalloy industry is different. The ways of processing most ferroalloy slags are based on crushing and (or) granulation, magnetic and air separation, screening, etc. [8, 9].

The estimation of the cost of design decisions can be carried out by various methods, including the method of capitalization of income, the Olson method, the method of a company-peer or capital market, the method of net assets, etc. But to assess the economic efficiency of implementation of the investment project on the use of man-made mineral formations, we can distinguish three main approaches: comparative assessment, taking into account the comparison of a technogenic product with a traditional one; valuation of discounted cash flows (DCF), including the value of cash flows expected in the future; assessment of conditional requirements based on the real options method.

The calculation of the present value of the expected cash flows takes into account their discounting. The discount rate reflects the risk of future cash flows. In this case, the calculation of cash flows depends on the chosen strategy, which takes into account the disposal or use of ferroalloy production wastes in a particular area. The formulas necessary for determining the indicators of environmental and economic efficiency are systematized in Table 5.

When assessing the net environmental income, the calculation formula of which is given in Table 5, the sum of environmental results takes into account the cost expression of the prevented environmental damage resulting from the processing of waste, contributing to the release of the land they occupy and reducing the impact on the land of harmful substances contained in the waste. The amount of environmental costs includes the cost expression of the environmental damage caused by additional emissions of pollutants into the atmosphere and from pollution of surface water bodies.

The main methodological principle for determining the environmental and economic feasibility of involving ferroalloy industry waste in production is the analysis of environmental results (inflows) and costs (outflows) of the project in money. The calculation of the environmental component of net present value (present value of expected cash flows) in the *t*-th year is carried out according to the formula:

$$\text{ЧПД}^{t}_{\text{эл}} = \frac{\text{ЧД}^{t}_{\text{эл}}}{\left(1+r\right)^{t}}.$$

Table 5. Indicators of environmental and economic efficiency of recycling and use of ferroalloy waste.
Таблица 5. Показатели эколого-экономической эффективности утилизации и использования ферросплавных отходов.

Formula	Explanation
$ЧПД = \sum_{t=1}^{t=n} \frac{ДП_t}{(1+r)^t}$	ЧПД – NPV – net present value of an asset; n is the life of the asset; ДП – CF – cash flows for the period t; r is the discount rate [10]
$Э_{ут} = \left(\frac{n_1}{a}\right)(C_1 + n_2C_2 - C_3)$	$Э_{ут}$ – E_{rec} – economic effect of materials recovery of the ferroalloy industry; C_1,$C3$ – cost of materials from traditional and recycled materials, respectively; C_2 – annual maintenance costs for dumps; n_1 – coefficient that reflects the share of costs of this type of material in the total costs of raw materials; n_2 – coefficient that reflects the partial or complete elimination of dumps (0.3 <n <1); a is the specific consumption of recycled materials per unit [11]
$Э_{исп} = \frac{(Ц - C)Д}{K_к}$	$Э_{исп}$ – E_{use} – economic efficiency of using ferroalloy industry wastes, rub.; Ц – P is the selling price of a unit based on waste, rubles; C is the cost of a unit based on waste, rub.; Д –D – the projected annual volume of waste production of ferroalloy industry, units; $K_к$ – capitalization ratio, share units [12]
$\Delta P_o = \sum_{i=1}^{n} \left[Ц_{oi} - (C_{oi} + D_i)\right] A_{oi}$	ΔP_o – increase in the company's net profit as a result of the integrated use of ferroalloy industry wastes, rubles; $Ц_{oi}$ – P_oi – selling price of the final product, in the production of which the replaced resource i was used, rubles; C_{oi} – cost of production of a unit of similar products obtained using waste, rub.; D_i – total deductions to the budget, taking into account benefits for the use of man-made raw materials, rubles; A_{oi} – volume of sold products in physical terms obtained using waste [4]
$\Delta У = \Delta У_в + \Delta У_б$	$\Delta У$ – effect of reducing environmental damage; $\Delta У_в$ – reduction of damage from the development of dumps; $\Delta У_б$ – reduction of damage to water and other types of economy [4]
$ЧД^t_{эл} = P^t_{эл} - З^t_{эл}$	$ЧД^t_{эл}$ – NI – net environmental income received in the t-th year; $P^t_{эл}$ – sum of the environmental results obtained in the t-th year; $З^t_{эл}$ – amount of environmental costs incurred in the t-th year [13]

In this case, the discount rate r shows the expected profitability of the project. The r indicator can be determined on the basis of the universal capital asset pricing model (CAPM) adapted to the real conditions of the project. Thus, the CAPM model has the form:

$$r = r_0 + \beta\,(R_p - r_0),$$

where r_0 is the risk-free rate of return; R_p – market profitability of processing waste into the final product; β - an indicator of the volatility of the price of the final product on the market (reflects the riskiness of investment in relation to the market).

Then the formula of the integrated environmental and economic net discounted income for the duration of the project (NPV$_{ee}$) will take the form:

$$ЧПД_{ээ} = \sum_{t=1}^{n} ЧПД^t_{эн} + \sum_{t=1}^{n} ЧПД^t_{эл},$$

where $ЧПД^t_{эн}$ is the economic component of net present value in the t-th year.

The competitiveness of ferroalloy production and industry as a whole is significantly affected by the stimulation of innovation and the promotion of new technological solutions. Such decisions should take into account the requirements of the modern economic system, ecology and resource conservation, as well as contribute to achieving a high level of quality of manufactured products. Previous studies have made it possible to justify the need for a methodological tool, the implementation of which takes into account the strategic flexibility mechanism. As part of assessing the economic efficiency of new technological solutions in metallurgy (in ferroalloy industry, in particular), which meet the criteria of the best available technologies, the real options method has shown good results [14]. With this in mind, the methodological approach to valuating the environmental and economic efficiency of processing man-made mineral formations of ferroalloy industry can contain three stages (Fig. 2).

I stage. Preliminary evaluation of the effectiveness of the use of technogenic formations.

- Integral economic effect
- Ratio of costs and the expected effect of use
- Simple rate of return
- Payback period

II stage. Economic justification of the effectiveness of the project on the use of technogenic entities.

- Commercial performance indicators
- Environmental and economic efficiency
- Integral efficiency

III stage. Evaluation of strategic project flexibility.

- Choice of option pricing method (Black-Scholes model, Cox-Ross-Rubinstein binomial model, etc.)
- Formation of the base of the main real options taken into account by the investment project
- Development of an investment project valuation algorithm (in the form of a binary event tree)

In conditions of environmental uncertainty, especially in some areas such as ferroalloy industry, investment design planning should take into account elements of strategic flexibility. In recent years, the largest industrial companies have increasingly used the real options method, which is considered to clarify the net present value, since it allows you to take into account the main risks of the project [15-17]. A real option shows the right, but not the obligation of its owner to perform any operations with assets in the future. The calculation of the value of a real option is carried out according to the Black–Scholes formula used to evaluate CALL financial options of the American and European types [18]. The application of the American option is possible at any time, but not later than the date of its exercise. In practice, they also use the formulas for the European option, which differs in the date of its exercise (it can be executed only on the specified date). To calculate the real American-style CALL option, it is advisable to take the Black-Scholes formula modified by R. Merton, taking into account the payment of dividends, which reduce the value of

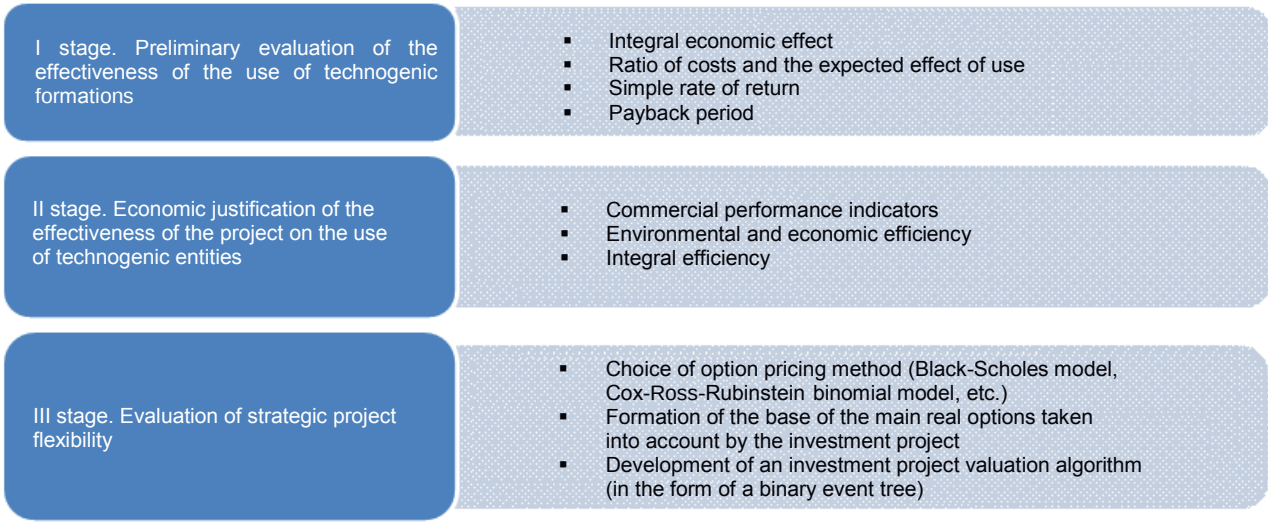


Figure 2. Stages of implementation of the methodological approach to valuating the environmental and economic efficiency of processing man-made mineral formations of ferroalloy industry taking into account strategic flexibility. ***Made by the authors.***
Рисунок 2. Этапы реализации методического подхода к оценке эколого-экономической эффективности переработки техногенных образований ферросплавных производств с учетом стратегической гибкости. ***Составлено авторами.***

the asset. For this, the system of model elements is supplemented with an indicator reflecting the value of *y* lost during the life of the option. In a modified form, the Black–Scholes formula has the following form:

$$C(t)=Se^{-yt}\Phi(z_1)-Xe^{-rt}\Phi(z_2)$$

where

$$z_1=\frac{\ln\left(\frac{S}{X}\right)+\left(r-y+\frac{\sigma^2}{2}\right)t}{\sigma\sqrt{t}}+\frac{\sigma\sqrt{t}}{2};$$

$$z_2=z_1-\sigma\sqrt{t};$$

$$\Phi(z)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{y}\mathrm{e}\left(-\frac{x^2}{2}\right)dx.$$

The decoding of the elements of the formula is presented in Table 6. To evaluate options in the field of processing of man-made mineral formations of ferroalloy industry, elements of the formula are adapted to the corresponding real sector of the economy.

The use of real options in projects for the processing of man-made mineral formations involves a change in design parameters in connection with the integration of flexibility elements designed to increase the overall effectiveness of the project. To identify these elements and determine their content, we systematize the main types of real options in the studied sector (Table 7).

Table 6. The ratio of the elements of the Black–Scholes model relative to financial and real options in the field of processing of man-made mineral formations of ferroalloy industry.
Таблица 6. Соотношение элементов модели Блэка–Шоулза относительно финансовых и реальных опционов в сфере переработки техногенных образований ферросплавных производств.

Model element name	The essence of the model element within the financial option	The essence of the model element in the framework of a real option in the field of processing of man-made mineral formations of ferroalloy industry
C(*t*)	The value of the CALL option for time *t* in selected units of time before exercise	Cost of accountability for strategic flexibility in the use of ferroalloy waste
S	The current price of the underlying asset	Current value of cash flows of an investment project for the processing of ferroalloy waste
r	Risk-free return (effective rate per unit of time with continuously compounded interest)	Risk-free return rate
X	Exercise price	Cost estimate associated with the processing of ferroalloy industry waste
[Xe]^(–*rt*)	Present value of asset strike price	Present value of the price of costs associated with the processing of ferroalloy waste
σ	The standard deviation of the return on the underlying asset for the period in question (with continuous compounding)	Uncertainty of the project cash flows due to the variability of market demand for the final product from technogenic raw materials
Φ(*z*)	Standard normal distribution function (cumulative)	Cumulative distribution function
y	The current value of dividends reducing the value of shares	The value lost during the life of an option

Made by the authors.
Составлено авторами.

Table 7. Real options in the field of processing of man-made mineral formations of ferroalloy industry.
Таблица 7. Реальные опционы в сфере переработки техногенных образований ферросплавных производств.

The name of a real option	Content
Bide time option	It makes it possible to choose the time for the start of the project, as well as the suspension of the project in the event of adverse external conditions and restarting it at a more convenient time. The use of this option in the framework of the project for processing of man-made mineral formations of ferroalloy industry can be justified, for example, by a decrease in demand for technogenic raw materials.
Growth option	It is used when the initial investment is a prerequisite for future development.
Scalable option	It allows a ferroalloy plant to optimize the development of dumps by changing the volumes of processed slag both upward or downward due to changes in environmental conditions
Sequential investment option	It is inappropriate due to the simplicity of the technology of slag processing
Input mix option	It gives the option holder the right to vary between types of slag acceptable for the production of the final product
Product flexibility option	It consists in the fact that, in the event of unfavorable market conditions, partially or completely redirect slag destined for the main product for recycling
Project rejection option	It becomes relevant in the event of adverse environmental conditions for the processing of slag and is applicable to reduce the associated losses. Depending on the progress of the project, cost recovery may be partial or full, accompanying the termination of the project

Source: made by the authors.
Составлено авторами.

Taking the Black-Scholes model as the basis for evaluating the value of options allows us to identify factors that have a significant impact on project efficiency. The evaluation algorithm of the investment project for processing of man-made mineral formations of ferroalloy industry using the real options method can be presented in the form of a binary event tree (Fig. 3). The key factor underlying the task of forming-up the tree of events is the creation of conditions for the development of the market for dome products of ferroalloy industry.

The event tree models the options for managerial decisions considered in the project, the adoption of which is advisable when the environmental conditions change. Each branch from the baseline scenario has its own real option valued according to the Black–Scholes model and adapted to the conditions of the real sector of the economy. Thus, the model evaluates the strategic value of the project. Acceptance of the terms of strategic flexibility based on real options increases the cost of the project in comparison

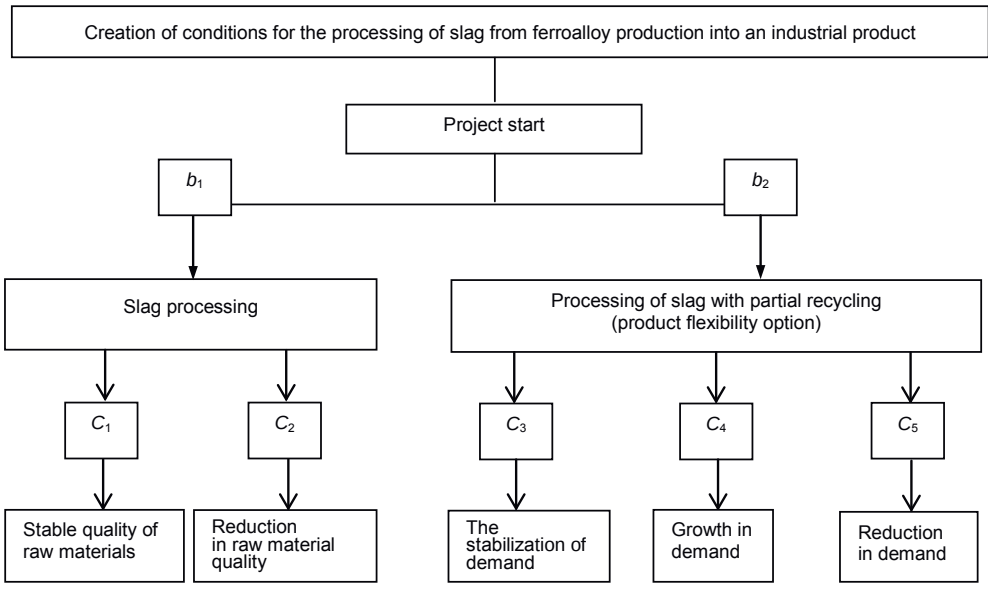


Figure 3. General scheme of the binary event tree for projects on the processing of man-made mineral formations of ferroalloy industry. a – the moment of the start of the project, when all the conditions for processing slag into an industrial product are created; b_1 – the basic version of the project; b_2 – implementation of the product flexibility option; C_1– implementation of the basic version of the project; C_2 – implementation of the project in conditions of decreasing quality of slag / sludge; C_3 – stabilization of demand for industrial waste –implementation of the basic version of the project; C_4 – increased demand for industrial waste; C_5 – reduced demand for industrial waste – implementation of the bide time option or the option of rejecting the project. *Made by the authors.*
Рисунок 3. Общий вид бинарного дерева событий для проектов по переработке техногенных образований ферросплавных производств. а – момент начала проекта, когда созданы все условия для переработки шлаков в техногенный продукт; b_1 – базовый вариант реализации проекта; b_2 – реализация опциона продуктовой гибкости; C_1 – реализация базового варианта реализации проекта; C_2 – реализация проекта в условиях снижения качества шлаков/шламов; C_3 – стабилизация спроса на техногенные отходы – реализация базового варианта реализации проекта; C_4 – рост спроса на техногенные отходы; C_5 – снижение спроса на техногенные отходы – реализация опциона выжидания благоприятного времени, либо опциона отклонения проекта. *Составлено авторами.*

with the basic version of its implementation, nevertheless, in the conditions of a high degree of uncertainty in the global situation, this approach minimizes the risk of the project (allows you to take into account the main risks of the project).

Choosing the best option for working with waste, whether it is processing or recycling, can solve problems such as release of the land they occupy and the reduction of the impact on the land of the harmful substances contained in the waste, which alone determines income generation as a result of prevented environmental damage. The solution to the problem of expanding the raw material base is no less important. In addition, the adoption within the metallurgical industry of an industry-specific methodology for assessing the costs of transitioning organizations to BAT principles taken into account by the Ecology National Project, will allow relying on incentives in the form of tax benefits (deductions), accelerated depreciation of fixed assets, or use of funds spent on the implementation of BAT as a calculation for environmental damage.

Conclusion

The development of technologies for processing of man-made mineral formations allows us to expand the market for "dome products". So, for example, the possibility of mastering the technology of obtaining refractory materials from chrome ferroalloys from production wastes is being examined. The development of the technological base for the production of technogenic ferroalloy products will contribute to the formation of a new way of perceiving metallurgy as an environmentally friendly (greenfield).

The methodological approach proposed in this paper is intended to determine the environmental and economic feasibility of involving ferroalloy industry in the production of waste taking into account the strategic flexibility of technological decisions. Preliminary results of the study at the Institute of Metallurgy (Imet) and the Institute of Economics (IE) of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences confirm the feasibility of using the real options methodology. Further research in this direction will be focused on clarifying methodological features and carrying out further calculations in the field of environmental and economic efficiency of using waste products from the production of chromium, manganese and silicon ferroalloys.

This paper was prepared with the support of the Russian Foundation for Basic Research grant No. 18-29-24027 "Study of the physico-chemical characteristics of industrial wastes of ferroalloy industry and the development of fundamental technical and economic foundations for their effective environmentally friendly processing."

REFERENCES

1. Ferroalloy market in 2017–2018: production in Russia. MetallResearch. Metallurgical studies. URL: http://www.metalresearch.ru/ferroalloys_market_2017-2018.html
2. Romanova O. A. 2019, *Ekologicheskiy imperativ pererabotki tekhnogennykh otkhodov v usloviyakh formirovaniya ekonomiki zamknutogo tsikla* [The environmental imperative of processing industrial waste in the context of the formation of a closed-loop economy]. Basic research and applied development of processes for processing and disposal of industrial structures: proceedings of the "Tekhnogen-2019" Congress with international participation. Ekaterinburg, pp. 62–65.
3. Roginko S. A., Shevelev L. N. 2018, Paris Agreement and Russian Metallurgy: time to reduce risks and stimulate energy saving. *Stal'* [Steel], No 12, pp. 61–66. (*In Russ.)*
4. Dvorkin L. I., Dvorkin O. L. 2007, *Stroitel'nyye materialy iz otkhodov promyshlennosti* [Building materials from industrial waste], Rostov-on-Don, 367 p.
5. Zhuchkov V. I., Leontiev L. I., Sychev A. V., Dashevsky V. Ya., Zayakin O. V. 2019, *Otkhody ferrosplavnoy promyshlennosti Rossii* [Wastes of the ferroalloy industry of Russia]. Basic research and applied development of processing and recycling of man-made mineral formations: proceedings of the "Tekhnogen-2019" Congress with international participation. Yekaterinburg, pp. 99–102.
6. 2017, *O sostoyanii i ob okhrane okruzhayushchey sredy Sverdlovskoy oblasti v 2017 godu* [The Sverdlovsk Region National Environmental report],
7. Zhuchkov V. I., Sychev A. V., Zayakin O. V., Leontiev L. I. 2019, *Ispol'zovaniye tekhnogennykh otkhodov ferrosplavnogo proizvodstva* [The use of industrial wastes of ferroalloy industry]. Basic research and applied development of processes for processing and recycling of industrial formations: proceedings of the "Tekhnogen-2019" Congress with international participation. Yekaterinburg, pp. 96–99.
8. Shevchenko V. F. 2013, *Proizvodstvo ferrosplavov: zavody, tsekhi, elektropechi* [Ferroalloys production: factories, workshops, electric furnaces]. Kharkov, 424 p.
9. Mysik V. F., Zhdanov A. V. 2014, *Proyektirovaniye i oborudovaniye elektroferrosplavnykh tsekhov* [Design and equipment of electroferroalloy workshops], Ekaterinburg, 526 p.
10. Damodaran A. 2004, *Investitsionnaya otsenka* [Investment valuation]. Tools and techniques for valuing any assets. Moscow, 1342 p.
11. Makarova V. N. 2018, *Ekonomicheskaya effektivnost' utilizatsii shlakov ferrosplavnogo proizvodstva* [The economic efficiency of slag recycling in ferroalloy industry]. Prospects for the development of metallurgy and mechanical engineering using completed basic research and R&D: ferroalloys: works of scientific conference. Ekaterinburg, pp. 340–341.
12. Tatarkin A. I., Balashenko V. V., Loginov V. G., Ignatieva M. N. 2016, Methodological tools for valuation of the investment attractiveness of renewable resources of the northern and Arctic territories. *Ekonomika regiona* [Economy of the region], vol. 12, issue 3. pp. 627–637. (*In Russ.*)
13. Vyvarets K. A., Vyvarets A. D. 2008, A conceptual approach to overcoming the "oppression" of discounting. *Vestnik YUUrGU* [Bulletin of the South Ural State University], Ser. "Economics and management", no. 20(120), pp. 33–39. (*In Russ.*)
14. Sirotin D. V. 2016*, Otsenka ekonomicheskoy effektivnosti novykh tekhnologicheskikh resheniy v metallurgii regiona* [Evaluation of the economic efficiency of new technological solutions in the metallurgy of the region. Development of territorial socio-economic systems: theory and practice], collection of scholarly articles of the XIV International scientific conference of young scientists. Ekaterinburg, pp. 187–189.
15. Zakrevskaya E. A., Detkova M. E. 2018, Prospects for the application of the real options method to determine the optimal investment moment. *Fundamental'nyye issledovaniya* [Fundamental research], pp. 122–126. (*In Russ.*)
16. Zubarev G. V., Ozdoeva A. Kh. 2018, The use of real options as a method of reducing risks for making design decisions in the oil and gas industry. *Problemy ekonomiki i upravleniya neftegazovym kompleksom* [Problems of economics and management of an oil and gas complex], pp. 10–14. (*In Russ.*)
17. Shelepina I. G. 2018, Real options method for investment management in logistics. *RISK: Resursy, informatsiya, snabzheniye, konkurentsiya* [RISK: Resources, Information, Supply, Competition], no. 3, pp. 191–194. (*In Russ.*)
18. Pozdnyakova E. A. 2018, Evaluation of the economic efficiency of projects for the development of the mineral resource base using the real options method. *Ekonomika v promyshlennosti* [Russian Journal of Industrial Economics], no. 3, pp. 280–286 (*In Russ.*)

The article was received on July 16, 2019

УДК 338.2 https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-3-141-149

Методический подход к определению эколого-экономической эффективности переработки техногенных образований

Ольга Александровна РОМАНОВА*,
Дмитрий Владимирович СИРОТИН**

Институт экономики УрО РАН, Россия, Екатеринбург

Актуальность. Важность обеспечения экологической безопасности окружающей среды актуализирует развитие природоохранных мероприятий в горно-металлургическом комплексе. Существенное значение в решении этой проблемы имеет переработка техногенных образований. При этом в общей структуре ресурсов техногенного типа велика роль отходов ферросплавного производства, переработка которых во многом определяется совершенствованием развития технологического потенциала отрасли.
Цель работы – разработка методического подхода к определению эколого-экономической эффективности переработки техногенных образований.
Результаты. В работе систематизированы основные технологии получения техногенной продукции на базе шлаков ферросплавного производства. Уточнены объемы образования ферросплавных шлаков, пыли и шламов в России. На территории Свердловской области отмечено снижение объемов образования промышленных отходов различных классов опасности, в том числе шлаков ферросплавного производства в результате их частичной переработки. В статье отмечена необходимость разработки методического подхода к оценке эколого-экономической эффективности вовлечения в производство отходов ферросплавного производства с учетом оценки стратегической гибкости принимаемых технологических решений. В рамках данной задачи приведены основные подходы и систематизированы показатели оценки экономической эффективности утилизации и использования отходов с учетом экологического фактора. Представлена схема, учитывающая основные этапы реализации методического подхода оценки эколого-экономической эффективности переработки техногенных образований ферросплавных производств с учетом стратегической гибкости. Обоснована актуальность применения методологии реальных опционов, подчеркнута целесообразность расчета предложенных реальных опционов с применением модели Блэка–Шоулза. Разработана классификация возможных опционов в сфере переработки отходов ферросплавного производства, приведен общий вид бинарного дерева событий для проектов в этой сфере.
Выводы. Предложенные положения авторского методического подхода позволили сформировать методический инструментарий оценки эколого-экономической эффективности переработки отходов горно-металлургического производства, который может быть успешно использован на практике.

Ключевые слова: ферросплавное производство, отходы, техногенные образования, «купольные продукты», оценка эффективности, реальные опционы, наилучшие доступные технологии.

Статья подготовлена при поддержке гранта РФФИ № 18-29-24027 «Исследование физико-химических характеристик техногенных отходов ферросплавного производства и разработка фундаментальных технико-экономических основ их эффективной экологически безопасной переработки».

ЛИТЕРАТУРА

1. Рынок ферросплавов в 2017–2018 г.: производство в России. MetallResearch. Металлургические исследования. URL: http://www.metalresearch.ru/ferroalloys_market_2017-2018.html
2. Романова О. А. Экологический императив переработки техногенных отходов в условиях формирования экономики замкнутого цикла // Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований: труды конгресса «Техноген-2019» с международным участием. Екатеринбург: УрО РАН, 2019. С. 62–65.
3. Рогинко С. А., Шевелев Л. Н. Парижское соглашение и российская металлургия: время снижать риски и стимулировать энергосбережение // Сталь. 2018. № 12. С. 61–66.
4. Дворкин Л. И., Дворкин О. Л. Строительные материалы из отходов промышленности. Ростов н/Д: Феникс, 2007. 367 с.
5. Жучков В. И., Леонтьев Л. И., Сычев А. В., Дашевский В. Я., Заякин О. В. Отходы ферросплавной промышленности России // Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований: труды конгресса «Техноген-2019»с международным участием. Екатеринбург: УрО РАН, 2019. С. 99–102.
6. О состоянии и об охране окружающей среды Свердловской области в 2017 году: гос. доклад. Екатеринбург, 2018.
7. Жучков В. И., Сычев А. В., Заякин О. В., Леонтьев Л. И. Использование техногенных отходов ферросплавного производства // Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований: труды конгресса «Техноген-2019» с международным участием. Екатеринбург: УрО РАН, 2019. С. 96–99.
8. Шевченко В. Ф. Производство ферросплавов: заводы, цехи, электропечи. Харьков: Вокруг цвета, 2013. 424 с.
9. Мысик В. Ф., Жданов А. В. Проектирование и оборудование электроферросплавных цехов. Екатеринбург: УрФУ, 2014. 526 с.
10. Дамодаран А. Инвестиционная оценка. Инструменты и техника оценки любых активов / пер. с англ. М.: Альпина Бизнес Букс, 2004. 1342 с.
11. Макарова В. Н. Экономическая эффективность утилизации шлаков ферросплавного производства // Перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершенных фундаментальных исследований и НИОКР: ферросплавы: труды науч.-практ. конф. Екатеринбург. ООО Издательство и типография «Альфа Принт», 2018. С. 340–341.
12. Татаркин А. И., Балашенко В. В., Логинов В. Г., Игнатьева М. Н. Методический инструментарий оценки инвестиционной привлекательности возобновляемых ресурсов северных и арктических территорий // Экономика региона. 2016. Т. 12, вып. 3. С. 627–637.
13. Вываренц К. А., Вываренц А. Д. Концептуальный подход к преодолению «тирании» дисконтирования // Вестник ЮУрГУ. Сер. «Экономика и менеджмент». 2008. № 20(120). С. 33–39.
14. Сиротин Д. В. Оценка экономической эффективности новых технологических решений в металлургии региона // Развитие территориальных социально-экономических систем: вопросы теории и практики: сб. науч. статей XIV Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых. Екатеринбург: Ин-т экономики УрО РАН, 2016. С. 187–189.
15. Закревская Е. А., Деткова М. Е. Перспективы применения метода реальных опционов для определения оптимального момента инвестирования // Фундаментальные исследования. 2018. № 6. С. 122–126.
16. Зубарев Г. В., Оздоева А. Х. Использование реальных опционов как метод снижения рисков для принятия проектных решений в нефтегазовой промышленности // Проблемы экономики и управления нефтегазовым комплексом. 2018. № 6. С. 10–14.
17. Шелепина И. Г. Метод реальных опционов при управлении инвестициями в логистике // РИСК: Ресурсы, информация, снабжение, конкуренция. 2018. № 3. С. 191–194.
18. Позднякова Е. А. Оценка экономической эффективности проектов освоения минерально-сырьевой базы с использованием метода реальных опционов // Экономика в промышленности. 2018. № 3. С. 280–286.

Статья поступила в редакцию 16 июля 2019 г.

* econ@uran.ru
http://orcid.org/0000-0002-6459-881X
** sirotind.umk@mail.ru
http://orcid.org/0000-0002-3794-3956

УДК 330.15 https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-3-150-156

Предприятия-недропользователи в роли загрязнителей и защитников природной среды

Владимир Григорьевич ЛОГИНОВ[1*],
Маргарита Николаевна ИГНАТЬЕВА[1,2**],
Валерий Васильевич БАЛАШЕНКО[1***]

[1]Институт экономики УрО РАН, Россия, Екатеринбург
[2]Уральский государственный горный университет, Россия, Екатеринбург

Актуальность. Ухудшение экологической ситуации на территории промышленного освоения северных территорий требует принятия неотложных мер по предупреждению или смягчению негативного антропогенного воздействия на окружающую среду, в первую очередь при освоении ресурсов недр, учитывая, что наибольший техногенный пресс формируется при функционировании нефтегазодобывающей и нефтегазоперерабатывающей промышленности.
Цель работы – обобщение и анализ опыта природоохранной деятельности лидеров предприятий-недропользователей и обоснование системы мер, способствующих повышению эффективности последней.
Результаты. Обоснована роль предприятий-недропользователей в качестве основных загрязнителей окружающей среды, формирующих львиную долю техногенной нагрузки на ассимиляционный потенциал региона. Наибольший вклад ими вносится в общий объем выбросов загрязняющих веществ, что во многом связано с низкой степенью утилизации попутного нефтяного газа. В целях распространения положительного опыта природоохранной деятельности выявлены предприятия, лидирующие в этой сфере. В их числе – вертикально интегрированные компании «Лукойл», ОАО «Сургутнефтегаз», дочернее общество ОАО «НК «Роснефть» (бывшее ОАО «ТНК-ВР холдинг»). Достаточно подробно рассматривается их деятельность по достижению экологической безопасности, особое внимание уделено ОАО «Сургутнефтегаз», которое имеет лучшие показатели в России по использованию попутного газа и в 2014 и 2015 гг. возглавляло рейтинг экологически ответственных нефтегазовых компаний Российской Федерации. В целях повышения эффективности деятельности по защите природной среды предложена система мер, требующих реализации. К их числу относятся: более совершенное правовое регулирование охраны окружающей среды в силу несовершенства действующего на федеральном уровне нормативно-правового механизма в сфере охраны окружающей среды; законодательное урегулирование техногенной нагрузки на окружающую среду (выбросы, сбросы, размещение отходов) на основе стратегии наилучшей доступной технологии, т. е. с помощью технологических нормативов, отражающих допустимую массу выбросов/сбросов загрязняющих веществ в расчете на единицу выпускаемой продукции; повышение значимости регионального государственного экологического контроля; реализация региональных и федеральных программ в области охраны окружающей среды, ориентированных на решение приоритетных проблем, к числу которых в настоящее время относится развитие системы обращения с отходами производства и потребления; более широкое финансирование доступа к экологически безопасным технологиям, стимулирование разработки экотехнологий, поощрение инициатив по сохранению живых ресурсов; расширение сферы объектов, охватываемых государственной экологической экспертизой; создание системы непрерывного экологического образования.
Выводы. Использование опыта предприятий-недропользователей, лидирующих в сфере защиты природной среды, и реализация предлагаемой системы мер будут способствовать устойчивому экологическому развитию Югры.

Ключевые слова: устойчивое экологическое развитие, предприятия-недропользователи, загрязнители, защитники природной среды, природоохранная деятельность.

Введение

Экологическая обстановка на территории Ханты-Мансийского автономного округа – Югры определяется, главным образом, функционированием нефтегазодобывающей и нефтегазоперерабатывающей отраслей. Наибольший вклад в общий объем выбросов загрязняющих веществ (по видам экономической деятельности) вносит раздел «добыча полезных ископаемых», на долю которого приходится 76–80 % выбросов, далее следует раздел «транспорта и связи» – 16–18 %. Возрастание роли регионов добычи и первичной переработки экспортных ресурсов (прежде всего Югры), снижение вклада большинства развитых регионов обрабатывающей промышленности и деградация слабо индустриализированных республик и автономных округов с неконкурентоспособными предприятиями привели к тому, что на территорию трех автономных округов РФ (Ханты-Мансийский, Ямало-Ненецкий и Таймырский) приходилось около трети всего валового выброса страны. В период 2004–2007 гг. Югра впервые становится «лидером» в загрязнении атмосферы. Однако в последующие годы статус-кво был восстановлен благодаря принятым мерам в Ханты-Мансийском автономном округе – Югре по сокращению выбросов, которые в 2017 г. сократились по отношению к 2006 г. в 2,15 раза (рис. 1).

Наибольшее загрязнение воздуха наблюдается, во-первых, на участках, которые эксплуатируются более 35 лет (80 % всех выбросов), так как пробуриваются все новые скважины с повышенным газоизвержением для лучшего поддержания на определенном уровне добычи нефти. К тому же со временем на территории, где производится добыча нефти, создаются шламовые амбары для хранения отходов нефтедобычи, развивается инфраструктура – сооружения сбора и очистки нефти и газа, нефтехранилища, формируется система трубопроводного транспорта, создаются рабочие поселки с предприятиями ЖКХ. Во-вторых, повышенное загрязнение наблюдается на новых месторождениях из-за низкой степени утилизации попутного нефтяного газа (ПНГ). По данным Д. В. Московченко [1], под факельными установками в воздухе происходит увеличение по сравнению с фоном содержания диоксида азота и сажи в 2 раза, оксида углерода и метана – в 1,3 раза. На участках влияния разведочных и добывающих скважин количество сажи по сравнению с фоном увеличивается в 2 раза, диоксида азота – в 1,5 раза, диоксида серы – в 1,3 раза.

* log-wg@rambler.ru
https://orcid.org/0000-0002-266-5686
** ief.etp@m.ursmu.ru
https://orcid.org/0000-0001-9014-905X
*** bala10@mail.ru
https://orcid.org/0000-0003-0124-0885

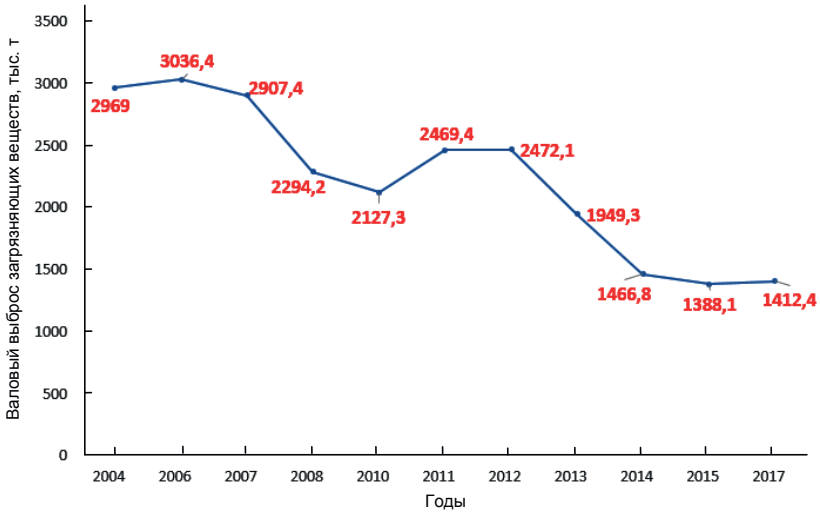


Рисунок 1. Валовый выброс загрязняющих веществ в атмосферу в ХМАО – Югре. Рассчитано по данным Ханты-Мансийск – Юграстата. Источники: Основные показатели окружающей среды: стат. бюл. М.: Росстат, 2005. С. 54–57; 2015. С. 40–42; Доклад об экологической ситуации в Ханты-Мансийском автономном округе – Югре в 2012, 2014, 2015 и 2017 гг.

Figure 1. Gross pollutant emissions into the atmosphere in the Khanty-Mansi Autonomous Okrug – Yugra. Calculated according to the Khanty-Mansiysk-Yugrastat. Sources: Key environmental indicators: statistical bulletin, Rosstat, 2005, pp. 54–57; 2015, pp. 40–42; Report on the environmental situation in the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug – Yugra in 2012, 2014, 2015 and 2017.

Рост объема выбросов усугубляется низким уровнем утилизации. В среднем по России этот показатель последние 15 лет стабильно находится на уровне 75 %, но по отдельным отраслям различается очень сильно. В частности, добыча топливно-энергетических полезных ископаемых имеет самый низкий показатель в промышленности – 14–19 %, включая еще и угледобычу, у которой уровень улавливания несколько выше. Основная отрасль специализации Югры – нефтедобыча – характеризуется еще меньшим уровнем утилизации, основная доля выбросов от стационарных источников (почти 76 % выбросов) приходится на добычу полезных ископаемых как следствие, и в округе этот показатель один из самых низких в стране. Ежегодно количество месторождений, вводимых в эксплуатацию, увеличивается. На освоенных месторождениях, где уже построены все необходимые сооружения для утилизации ПНГ, используется около 80–98 % его ресурсов, на новых месторождениях – 30 % и менее.

Если вклад Югры в общероссийский объем загрязнения атмосферы составляет 8,5 %, то его доля в объеме забранной воды из природных объектов вдвое меньше. Однако тенденция изменения данного показателя негативная. Если в среднем по стране поверхностный водозабор за период 2004–2014 гг. сократился на 20 %, то в округе вырос в 2,7 раза, достигнув 2422,8 млн м^3, а 2017 г. составил уже 3351 млн м^3. Даже Ямало-Ненецкий автономный округ характеризовался вдвое меньшими темпами роста, а промышленно развитые Свердловская и Челябинская области сократили водопотребление на 60 и 40 % соответственно. Такая негативная динамика связана с тем, что основным водопотребителем округа является промышленность, а основные позитивные сдвиги достигнуты в ЖКХ в связи с более рациональными расходами населения.

О неэкологичности водопользования свидетельствует использование свежей воды для удовлетворения хозяйственных нужд, доля которой составляет 99,1 %, при этом большая часть воды (более 75 %) расходуется на производственные нужды при среднероссийском уровне 58 %. По объему сброса загрязненных вод в поверхностные водоемы округ находится на 40-м месте среди субъектов РФ, отрицательным моментом является увеличение объемов сбросов загрязненных сточных вод без очистки. Поверхностные воды основных рек округа (по результатам наблюдений федеральной наблюдательной сети в 32 створах (26 пунктов наблюдений) в целом оцениваются как «грязные», и практически за последние годы их оценка не изменилась.

Одной из важнейших экологических проблем является высокий уровень накопленного загрязнения почв в отдельных районах нефтедобычи, связанный с высокой степенью износа основных фондов нефтегазодобывающей промышленности (трубопроводы), которые обусловили риск аварий и оказывают влияние на снижение биоразнообразия. Динамика образования и рекультивации земель представлена на рис. 2.

Из приведенного обзора следует, что состояние экологической ситуации на территории Югры определяют предприятия-недропользователи. От степени экологичности их производства, их экологической ответственности зависит качество окружающей среды: наличие свежего воздуха и чистой питьевой воды, а также «здоровье» экосистем, воспринимающих техногенное давление [2, 3]. К сожалению, промышленное освоение подчас разрушительно влияет на природную среду и на сообщества коренных народов[4, 5]. В России не достигнут паритет в отношениях аборигенов с промышленными компаниями с точки зрения двухстороннего учета интересов, взаимовыгодного развития и нейтрализации рисков [6]. Инвестиционные проекты экологической направленности получили развитие в мировой и отечественной экономике для решения природоохранных проблем, в частности возмещения экологического вреда и др. [7]. Данной проблематике посвящены многочисленные публикации отечественных исследователей [8–13 др.].

В связи с этим компании-недропользователи, с одной стороны, являются основными загрязнителями окружающей природной среды в автономном округе, с другой стороны, они принимают самое активное участие в предотвращении последствий своей негативной хозяйственной деятельности, понимая, что от этого во многом зависит экологическое состояние окружающей природной среды региона.

Рисунок 2. Динамика образования и рекультивации земель, загрязненных нефтью, нефтепродуктами, газовым конденсатом и подтоварной водой в ХМАО – Югре на конец года[1, 2].
Figure 2. The dynamics of the formation and reclamation of lands contaminated with oil, oil products, gas condensate and bottom water in the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug – Yugra at the end of the year[1,2].

Результаты

В целях распространения положительного опыта организации природоохранной деятельности были выявлены предприятия, лидирующие в деле защиты природной среды. К ним относятся вертикально интегрированные нефтяные компании, доминирующие в нефтегазовом секторе России. Роль малого и среднего бизнеса остается незначительной, что справедливо как для страны в целом, так и для большинства добывающих регионов, находящихся на различных стадиях освоения своего ресурсного потенциала [14]. Имея значительные финансовые активы, они обладают большей возможностью решать природоохранные задачи.К их числу, во-первых, относится вертикально интегрированная нефтяная компания «Лукойл», которая одной из первых внедрила в 1995 г. международные стандарты качества. Их внедрение началось после принятия внутрикорпоративной экологической программы (политики). Экологическая программа направлена на достижение экологической безопасности за счет внедрения природоохранных мероприятий, направленных на уменьшение объемов выбросов загрязняющих веществ в атмосферу, сбросов загрязненных сточных вод, водопотребления, аварийности с экологическим ущербом [15]Координатором ее выполнения является Управление промышленной и экологической безопасности и охраны труда, которое осуществляет оперативное управление и контроль за деятельностью своих 18 организаций-природопользователей. В дочерних обществах компании организованы специализированные отделы, в обязанности которых входит проведение мероприятий по профилактике аварийных ситуаций, минимизации негативного воздействия на окружающую среду и устранению имеющегося загрязнения, а также организация мониторинга.

Несомненным лидером нефтедобычи и решения экологических проблем является ОАО «Сургутнефтегаз», считающая природоохранный аспект приоритетным в своей деятельности. В компании основные положения экологической политики были также сформулированы в начале 1990-х гг. Она основывается на концепции устойчивого развития, реализация которой позволяет обеспечить сбалансированное решение социально-экономических задач, сохранение благоприятной окружающей среды в зоне деятельности предприятия в целях удовлетворения экологических потребностей нынешнего и будущих поколений. В числе важнейших направлений экологической политики: постоянное совершенствование природоохранной деятельности и системы экологического управления на предприятиях компании, достижение уровня промышленной и экологической безопасности, соответствующего современным международным нормам и требованиям, внедрение природо-, ресурсосберегающих и малоотходных технологий, экологический мониторинг на всех стадиях освоения месторождений и др.

ОАО «Сургутнефтегаз» постоянно разрабатывает и внедряет прогрессивные технологии, закупает современную технику, материалы, занимается обучением и повышением квалификации специалистов, создает новые природоохранные производства, например по переработке отходов. Компания обеспечивает высокий уровень инвестиций в охрану окружающей среды и экологическую безопасность производства. Так, за период с 2005 по 2007 г. компания инвестировала в это направление 28,5 млрд руб.[3] В 2014 г. на природоохранные мероприятия ОАО «Сургутнефтегаз» было направлено 18,6 млрд руб. (в 2011–2013 гг. в среднем 20,5 млрд руб.), в том числе 4,1 млрд руб. в строительство новых и реконструкцию действующих природоохранных объектов. В 2017 г. инвестиции в охрану окружающей среды составили 21,1 млрд руб.[4]

С начала 2000-х гг. компанией комплексно решается проблема повышения технологической безопасности трубопроводов. Принимаются трубы повышенной коррозионной стойкости, ведется мониторинг коррозии трубопроводов, ингибиторная защита, внедряются установки предварительного сброса воды на основе трехфазных сепараторов, что

[1] Экология и охрана окружающей среды: отчет о НИР/ОАО "СибНАЦ". Кн. 2, ч. 14. Гос. контракт № 1 от 12.01.2011 г.
[2] Доклад об экологической ситуации в Ханты-Мансийском автономном округе-Югре в 2012, 2014, 2015 и 2017 гг.
[3] Экологическая безопасность Уральского федерального округа: Информационно-аналитический альманах. Екатеринбург: Группа компаний «Технадзор», 2008. С. 186–187.
4 Экологический отчет ОАО «Сургутнефтегаз» за 2012–2017 гг. Экологические отчеты по годам. surgutneftegas.ru›responsibility/ecology…otchety

позволяет в 5–12 раз снизить риск аварий. Эффективно используется техника для локализации и ликвидации последствий аварий. ОАО «Сургутнефтегаз» имеет лучший показатель в России по использованию попутного нефтяного газа, который в 2017 г. составил 99,32 % 99,14 % (в 2012 г. – 99,2, в 2013 г. – 99,17, в 2014 – 99,14 %). ОАО «Сургутнефтегаз» четыре года подряд входит в тройку рейтинга самых экологически ответственных нефтяных компаний России. По итогам 2014 и 2015 гг. компания возглавляла рейтинг экологической ответственности нефтегазовых компаний России, а в 2016 и 2017 гг. была призером. Компания первой в стране применила один из самых эффективных способов утилизации ПНГ, построив газотурбинные электростанции на отдаленных месторождениях.

В числе производственных объектов и оборудования, повышающих экологическую безопасность производства ОАО «Сургутнефтегаз» и обеспечивающих ресурсосбережение, – газоперерабатывающий завод, расположенный в г. Сургуте; 22 газотурбинные и 7 газопоршневых электростанций; 27 компрессорных станций; 2 установки подготовки газа для утилизации попутного нефтяного газа; 108 установок предварительного сброса воды; 6 центров по отмывке нефтезагрязненного грунта; 3 центра по обезвреживанию шлама; 13 шламонакопителей суммарной вместимостью 33,4 тыс. м^3; 6 установок термического обезвреживания нефтешлама суммарной производительностью 42 тыс. м^3/год; полигон промышленных отходов вместимостью 13,1 тыс. т, предназначенный для накопления нефтешлама и размещения оборудования по термическому обезвреживанию; 4 полигона твердых бытовых и промышленных отходов для размещения с целью захоронения отходов производства и потребления суммарной вместимостью 1151 тыс. м^3; 9 мусоросжигательных установок для термического обезвреживания твердых нефтесодержащих отходов суммарной производительностью 4,45 тыс. т/год; установка по измельчению отходов бумаги производительностью 1150 кг/ч и пластиковой тары производительностью 50 кг/ч; установка по переработке шин для утилизации изношенных автомобильных покрышек и камер производительностью 5 тыс. т/год[5].

Одним из важных составляющих природоохранной деятельности предприятия является ведомственный экологический мониторинг. На большинстве территорий, где работает компания, это единственная реальная система наблюдений за компонентами природной среды. На основе проводимого постоянного анализа состояния территорий выявляются причины и последствия загрязнений и разрабатываются мероприятия, направленные на реабилитацию природной среды и обеспечение экологической безопасности промысловых объектов и предупреждение аварий на трубопроводах. Созданная в ОАО «Сургутнефтегаз» система по предупреждению и ликвидации аварийных разливов нефти является уникальной для России и соответствует мировым стандартам экологической безопасности в нефтяной отрасли. Корпоративная система экологического менеджмента позволяет снижать экологические риски и сокращать экономические издержки в условиях все более строгого государственного и международного регулирования в сфере охраны окружающей среды. Экологичность производства является серьезным фактором конкурентоспособности ОАО «Сургутнефтегаз». Экологический подход к реализации проектов развития и модернизации производства позволяет предприятию эффективно решать вопросы улучшения среды обитания в регионе.

Дочернее общество ОАО «НК «Роснефть» (бывшее ОАО «ТНК-ВР Холдинг») было первым нефтегазодобывающим предприятием в регионе, которое внедрило на своих активах систему экологического менеджмента (СЭМ), менеджмента как часть интегрированной системы управления природопользованием. В 2005 г. система экологического менеджмента предприятия была сертифицирована на соответствие требованиям международного стандарта ISO 14001:2004. В 2006–2007 гг. проведены надзорные пост-аудиты соответствия СЭМ требованиям международного стандарта независимой компанией SGSVostokLtD. По их результатам сертификация системы предприятия была продлена. Процессы подтверждения сертификации были продолжены в последующие годы. Очень большое внимание на предприятии уделяется проведению внутренних экологических аудитов. Их главный результат – разработка многочисленных рационализаторских рекомендаций и предложений, направленных на повышения культуры производства, сокращение потерь, энерго- и ресурсосбережение, охрану окружающей среды. Для реализации экологической политики на экологические программы в компании в период 2003–2009 гг. потрачено 2,2 млрд долл. Значительные средства выделены на замену труб на эксплуатируемых месторождениях, ликвидацию утечек нефти и промышленных загрязнений прошлых лет, утилизацию попутного нефтяного газа, охрану труда и т. д. Одно из ключевых направлений экологической инвестиционной программы – восстановление нефтезагрязненных земель общей площадью более 5000 га (в основном на Самотлорском месторождении). Часть средств вложена в рекультивацию шламонакопителей, утилизацию твердых отходов, очистку почв и грунтовых вод от загрязнения в результате утечек нефтепродуктов. В 2015 г. АО «Самотлорнефтегаз» увеличило уровень рационального использования попутного нефтяного газа до 98 %.

Считаем, что для повышения эффективности деятельности предприятий-недропользователей по защите природной среды требуется, во-первых, более совершенное правовое регулирование охраны окружающей среды. Действующий на федеральном уровне нормативно-правовой механизм в сфере охраны окружающей среды, несмотря на активизацию нормотворческой деятельности в последние годы, остается несовершенным. Федеральные законы, регулирующие отношения в данной области, содержат множество бланкетных статей и декларативных положений, требующих для своей реализации принятия нормативных правовых актов, определяющих порядок их работы. Их отсутствие или несвоевременное появление зачастую затрудняют или делают невозможным регулирование отдельных видов отношений в сфере охраны окружающей среды. Велико количество нормативных правовых актов, противоречащих актам, имеющим более высокую юридическую силу. Помимо этого, отметим наличие в действующем российском экологическом законодательстве нечетких правовых норм, допускающих различное толкование, что увеличивает его коррупционную емкость. Особо выделим недостаточную проработку федерального законодательства по следующим направлениям: экологическое нормирование, компенсационный механизм регулирования негативного воздействия на окружающую среду, стимулирование использования экологически чистых технологий, товаров и услуг, проведение экологического аудита. В этой ситуации отметим положительные результаты нормативно-правового регулирования в сфере охраны окружающей среды и природопользования на региональном уровне в условиях Ханты-Мансийского автономного округа, где сформирована

и постоянно развивается нормативно-правовая база, обеспечивающая регулирование полномочий автономного округа в сфере обеспечения экологической безопасности[5].

Второй момент касается законодательного урегулирования техногенной нагрузки на окружающую среду (выбросы, сбросы, размещение отходов) на основе стратегии наилучшей доступной технологии или наилучшей существующей технологии, т. е. с помощью технологических нормативов, отражающих допустимую массу сбросов/выбросов загрязняющих веществ в окружающую среду в расчете на единицу выпускаемой продукции.

Действенным механизмом предупреждения, выявления и пресечения природоохранных нарушений на территории Ханты-Мансийского автономного округа – Югры должен стать региональный государственный экологический надзор, в работе которого необходимо как можно шире использовать требования (претензии) о возмещении вреда (ущерба), причиняемого окружающей среде, а также компенсации вреда в натуральной форме (выполнение работ по рекультивации земель). Решению экологических проблем способствуют программы в области охраны окружающей среды и рационального природопользования, ориентированные на решение приоритетных проблем по обеспечению экологической безопасности. В частности, в настоящее время приоритетную значимость приобретает развитие системы обращения с отходами производства и потребления.

Требуется расширение сферы объектов, охватываемых государственной экологической экспертизой, базирующейся на принципах обязательности ее проведения, научной обоснованности, законности ее выводов, независимости, широкой гласности и участия общественности в принятии взвешенных управленческих решений.

Для успешной работы в области экологической экспертизы необходимо владеть информацией об объектах и субъектах конкретной хозяйственной деятельности и экологических последствиях ее воздействий на элементы окружающей среды, а также знаниями материалов законодательно-правовой и нормативной базы, на которой основаны организационно-процедурные принципы и правила проведения государственной экологической экспертизы.

Особенно важно финансировать доступ к экологически безопасным технологиям и соответствующим техническим ноу-хау, а также их разработку и передачу на льготных условиях нуждающимся предприятиям:

– создавать новые механизмы для финансирования (при покупке технологий) разработки, передачи и распространения экологически безопасных технологий;

– оказывать поддержку НИОКР организациям, финансируемым из разных источников, в целях создания стратегических союзов для расширения НИОКР с целью получения более чистой продукции и производственных экотехнологий для передачи и распространения этих технологий;

– собирать и распространять информацию об эффективных, с точки зрения затрат, примерах чистого производства, обеспечения экологической эффективности и рационального природопользования и поощрять обмен передовой практикой и знаниями в отношении экологически безопасных технологий между государственными и частными учреждениями;

– продолжать содействовать созданию и укреплению советов по устойчивому развитию и/или координационных структур, включая местный уровень, для привлечения внимания к политике в области устойчивого развития региона на высоком уровне; в связи с этим следует поощрять участие всех заинтересованных сторон;

– поощрять и поддерживать участие молодежи в программах и мероприятиях, связанных с устойчивым развитием, путем, например, поддержки местных молодежных советов или аналогичных организаций и содействия их созданию там, где их нет;

– поощрять корпоративную ответственность и подотчетность предприятий и обмен передовым опытом в контексте устойчивого развития;

– стимулировать использование экологической экспертизы на добровольной основе в качестве важного механизма более эффективной оценки взаимосвязей между окружающей средой и развитием;

– стимулировать разработку и более широкое использование технологий дистанционного зондирования со спутников, глобального картирования и систем географической информации для сбора надежных данных о воздействии на окружающую среду, землепользовании;

– сохранять биоразнообразие, поощрять и поддерживать инициативы по сохранению живых ресурсов в районах, подвергающихся серьезной опасности, и в других районах, имеющих важное значение с точки зрения биологического разнообразия, содействовать развитию национальных и региональных экологических сетей и коридоров;

– создавать системы непрерывного экологического образования, которые включают в себя сеть образовательных учреждений разного уровня, информационное эколого-образовательное пространство (сеть особо охраняемых природных территорий, средства массовой информации, библиотечные системы).

Перечисленная система мер должна дополняться действием нефтяных компаний через их участие в добровольных экологических программах и таких механизмах, как сертификация по экологическим требованиям, экологический аудит, экологические рейтинги.

Выводы

Использование опыта предприятий-недропользователей, являющихся лидерами в деле защиты природной среды, и реализация предлагаемой системы мер, направленных на повышение эффективности природоохранной деятельности будут способствовать устойчивому экологическому развитию Югры.

Статья подготовлена в соответствии с государственным заданием Министерства образования и науки России для ФГБУН «Институт экономики УрО РАН» на 2019 г.

[5]Отчет о НИР ОАО "СибНац", III этап (кн. 2, ч. 14). 190 с.

ЛИТЕРАТУРА

1. Московченко Д. В., Бабушкин А. Г. Нефтяное загрязнение поверхностных вод на территории ХМАО-Югры // Экология и промышленность России. 2014. № 4. С. 34–38.
2. Логинов В. Г. Социально-экономическая оценка развития природно-ресурсных районов Севера. Екатеринбург: Ин-т экономики УрО РАН, 2007. 311 с.
3. Литвинова А. А., Игнатьева М. Н., Косолапов О. В. К методическому обеспечению прогнозирования экологических последствий воздействия добычи нефти и газа в северных регионах // Изв. вузов. Горный журнал. 2011. № 7. С. 70–76.
4. Горбунов А. С. Проблемы и пути совершенствования социально-экономического развития коренных народов Севера в Ханты-Мансийском автономном округе – Югре // Бизнес в законе. Экономико-юридический журнал. 2010. № 3. С. 349–351.
5. Красовская Т. М. Природопользование Севера России. М.: ЛКИ, 2008. 270 с.
6. Тишков В. А. Коренные народы Российской Арктики. Доклад академика В. А. Тишкова, доктора исторических наук Н. И. Новиковой, кандидата исторических наук Е. А. Пивневой // Вестник РАН. 2015. Т. 85, № 5. С. 491–500.
7. Новоселов А. Л., Потравный И. М., Новоселова И. Ю., Чавез Феррейра К. Й. Механизм реализации инвестиционных проектов экологической направленности на основе долевого финансирования // Экономика региона. 2018. Т. 14 (4). С. 1488–1497.
8. Васильев С. И., Милосердов Е. Е., Булчаев Н. Д. Экологические проблемы при разработке нефтяных и газовых месторождений Восточной Сибири // Горная промышленность. 2015. № 3(121). С. 8–89.
9. Ерохина Е. А. Коренные малочисленные народы и добывающие компании на Обском Севере: сотрудничество или конфликт // ЭКО. 2018. С. 81–92.
10. Логинов В. Г., Игнатьева М. Н., Балашенко В. В. Этносоциоэкосистемный подход к оценке жизнедеятельности коренных малочисленных народов Севера // Экономика региона. 2018. Т. 14(3). С. 896–913.
11. Пахомов А. А., Мостахова Т. С. Арктические территории: проблемы развития и освоения (на примере Республики Саха (Якутия)) // Экономика востока России. 2014. № 2. С. 33–42.
12. Черняго Л. С., Бойкова Д. Н. Техногенная трансформация экосистем Севера в районах нефтедобычи // Разведка и охрана недр. 2012. № 7. С. 30–32.
13. Юдахин Ф. Н., Губайдуллин М. Г., Коробов В. Б. Экологические проблемы при освоении минерально-сырьевых ресурсов Архангельской области // Геоэкология. 2004. № 3. С. 195–206.
14. Крюков В. А., Токарев А. Н. Взаимосвязь активов и организационной структуры в нефтяной промышленности: региональные аспекты // Экономика региона. 2018. Т. 14(4). С. 1076–1087.
15. Солодовников А. Ю., Хатту А. А. Воздействие нефтегазодобычи на окружающую среду в Тюменской области: роль и значение экологического менеджмента в решении экологических проблем // Региональная экология. 2010. № 4(30). С. 86–96.

Статья поступила в редакцию 25 июля 2019 г.

УДК 330.15 https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-3-150-156

Subsoil users as pollutants and environmentalists

Vladimir Grigor'evich LOGINOV[1*],
Margarita Nikolaevna IGNAT'EVA[1,2*],
Valeriy Vasil'evich BALASHENKO[1***]

[1]Institute of Economics of the Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russia
[2]Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia

Relevance. The deterioration of the environmental situation within the territory of industrial development of the northern territories requires urgent measures to prevent or mitigate the negative anthropogenic impact on the environment, primarily in the development of subsoil resources, given that the largest man-made pressure is formed during the functioning of the oil and gas production and oil and gas processing industry.
Purpose of the work – generalization and analysis of the experience of environmental activities of the leaders of enterprises-subsoil users and the justification of a system of measures to enhance the effectiveness of the latter.
Results. The role of enterprises, subsurface users, as the main environmental pollutants, which form the lion's share of the technogenic load on the assimilation potential of the region, is substantiated. They make the largest contribution to the total volume of pollutant emissions, which is largely due to the low degree of utilization of associated petroleum gas. In order to disseminate positive environmental protection experience, enterprises have been identified (such as Lukoil, Surgutneftegas, a subsidiary of NK Rosneft (formerly TNK-BP Holding)). Their activities to achieve environmental safety are considered in sufficient detail, special attention is paid to Surgutneftegas, which has the best indicators in Russia in the use of associated gas in 2014. In 2015, it led the rating of environmentally responsible oil and gas companies in the Russian Federation. In order to increase the effectiveness of environmental protection activities, a system of measures requiring implementation is proposed. These include: more advanced legal regulation of environmental protection due to the imperfection of the regulatory mechanism in force in the field of environmental protection at the federal level; legislative regulation of anthropogenic environmental burden (emissions, discharges, waste disposal) based on the strategy of the best available technology, i.e. using technological standards that reflect the allowable mass of pollutant emissions / discharges per unit of output; increasing the importance of regional state environmental control; implementation of regional and federal programs in the field of environmental protection focused on solving priority problems, which currently include the development of a system for managing production and consumption waste; broader financing of access to environmentally sound technologies, stimulating the development of environmental technologies, encouraging initiatives to conserve living resources; expanding the scope of facilities covered by state environmental impact assessment; creation of a system of continuing environmental education.
Conclusions. The use of the experience of mining enterprises, leaders in their sector, and the implementation of the proposed system of measures will contribute to the sustainable environmental development of Ugra.
Keywords: sustainable environmental development, subsoil user enterprises, pollutants, environmentalists, environmental activities.

The paper was prepared in accordance with the state task of the Ministry of Education and Science of Russia for the Institute of Economics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences for 2019.

REFERENCES

1. Moskovchenko D. V., Babushkin A. G. 2014, Oil pollution of surface water in the Khanty-Mansi Autonomous Okrug-Ugra. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and industry of Russia], no. 4, pp. 34–38. (*In Russ.*)
2. Loginov V. G. 2007, *Sotsial'no-ekonomicheskaya otsenka razvitiya prirodno-resursnykh rayonov Severa* [Socio-economic assessment of the development of natural resource regions of the North]. Ekaterinburg, 311 p.
3. Litvinova A. A., Ignatieva M. N., Kosolapov O. V. 2011, On methodological support for predicting the environmental consequences of oil and gas production in the northern regions. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal* [News of the Higher Institutions. Mining Journal], no. 7, pp. 70–76. (*In Russ.*)
4. Gorbunov A. S. 2010, Problems and ways of improving the socio-economic development of the indigenous peoples of the North in the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug – Ugra. *Biznes v zakone. Ekonomiko-yuridicheskiy zhurnal* [Business in Law. Journal of Economics and Law], no. 3, pp. 349–351. (*In Russ.*)
5. Krasovskaya T. M. 2008, *Prirodopol'zovaniye Severa Rossii* [Nature management of the North of Russia]. Moscow, 270 p.
6. Tishkov V.A. 2015, Indigenous peoples of the Russian Arctic. Report of academician V. A. Tishkov, Doctor of Historical Sciences N. I. Novikova, Cand. Sc. History E. A. Pivneva. *Vestnik RAN* [Herald of the Russian Academy of Sciences], vol. 85, no. 5, pp. 491–500. (*In Russ.*)
7. Novoselov A. L., Potravny I. M., Novoselova I. Yu., Chavez Ferreira K. Y. 2018, The mechanism for the implementation of environmental investment projects based on shared financing. *Ekonomika regiona* [The economy of the region], vol. 14 (4), pp. 1488–1497. (*In Russ.*)
8. Vasiliev S. I., Miloserdov E. E., Bulchaev N. D. 2015, Environmental problems in the development of oil and gas fields in Eastern Siberia. *Gornaya promyshlennost'* [Mining industry], no. 3(121), pp. 8–89. (*In Russ.*)
9. Erokhina E. A. 2018, Indigenous peoples and mining companies in the Ob North: cooperation or conflict. *EKO* [All-Russian ECO journal], pp. 81–92. (*In Russ.*)
10. Loginov V.G., Ignatieva M.N., Balashenko V.V. 2018, Ethnosocioecosystem approach to assessing the vital activity of the indigenous peoples of the North. *Ekonomika regiona* [The economy of the region], vol. 14(3), pp. 896–913. (*In Russ.*)
11. Pakhomov A. A., Mostakhova T. S. 2014, Arctic territories: problems of development and development (using the Republic of Sakha (Yakutia) as an example*). Ekonomika vostoka Rossii* [Economy of the East of Russia], no. 2, pp. 33–42. (*In Russ.*)
12. Chernyago L. S., Boykova D. N. 2012, Technogenic transformation of ecosystems of the North in oil production areas. *Razvedka i okhrana nedr* [Prospect and protection of mineral resources], no. 7, pp. 30–32. (*In Russ.*)
13. Yudakhin F. N., Gubaidullin M. G., Korobov V. B. 2004, Environmental problems in the development of mineral resources of the Arkhangelsk region. *Geoekologiya* [Geoecology], no. 3, pp. 195–206. (*In Russ.*)
14. Kryukov V. A., Tokarev A. N. 2018, Interrelation of assets and organizational structure in the oil industry: regional aspects. *Ekonomika regiona* [The economy of the region], vol. 14(4), pp. 1076–1087. (*In Russ.*)
15. Solodovnikov A. Yu., Hattu A. A. 2010, Environmental impact of oil and gas production in the Tyumen region: the role and importance of environmental management in solving environmental problems. *Regional'naya ekologiya* [Regional ecology], no. 4(30), pp. 86–96. (*In Russ.*)

The article was received on May 10, 2019

* ✉ log-wg@rambler.ru
https://orcid.org/0000-0002-266-5686
** ief.etp@m.ursmu.ru
https://orcid.org/0000-0001-9014-905X
*** bala10@mail.ru
https://orcid.org/0000-0003-0124-0885

УДК 330.15 https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-3-157-161

Методологические положения формирования и оценки экономического ущерба

Андрей Николаевич ИВАНОВ*

Уральский государственный горный университет, Россия, Екатеринбург

Актуальность. Обоснование наиболее приоритетных направлений социально-экономического развития, оценка степени опасности происходящих явлений и процессов, определение необходимого уровня экологической опасности требуют наличия информации об экономическом ущербе, обуславливаемом формированием последствий под влиянием антропогенных воздействий.
Цель исследования – уточнение понятия экономического ущерба, формирования его структуры, выявления объектов, в отношении которых осуществляется оценка экономического ущерба, обоснование основополагающих принципов его формирования и оценки.
Результаты и их применение. В процессе исследования было уточнено понятие ущерба в соотношении с понятием упущенной выгоды и потерями, рекомендуется использование трактовки ущерба в широком и узком смысле слова. Определена структура формирования экономического ущерба, доказана целесообразность обращения к методическому подходу оценки снижения экономической ценности при выявлении величины экономического ущерба у биоты, который на сегодня используется уже рядом исследователей. Достоверность оценки в этом случае зависит во многом от обоснованности коэффициента снижения экономической ценности α и экономической оценки ресурса, в отношении которого рассчитывается экономический ущерб. Обобщение и анализ исследований показал, что их авторами рекомендуется выделение 3–5 экологических зон, для каждой из которых предлагается коэффициент α или интегральный коэффициент сохранности (ИКС), имеющий прямо противоположное значение относительно α. Имеют место исследования, детализирующие α, но пока их отличает достаточно большая сложность расчетов. При экономической оценке природных ресурсов используется весь набор методических подходов. Для настоящего времени характерен рост числа исследований, ориентированных на экономическую оценку экосистемных услуг. Предполагается рассматривать экономический ущерб как комплексную величину, слагающуюся из частных экономических ущербов, причиняемых собственнику ресурсов, пользователю ресурсов, а при оценке экономического ущерба экосистемных услуг – мировому сообществу и т. д. Сформированы основополагающие принципы формирования экономического ущерба и его оценки, которые могут служить основой выполнения исследований по рассматриваемой тематике.

Ключевые слова: вред, структура, принципы, ресурсный подход, экономическая оценка, экономический ущерб.

Введение

Последствия, обуславливаемые антропогенными воздействиями при освоении ресурсов недр, в большинстве случаев носят отрицательный характер (порча имущества, недополучение выгоды, рост заболеваемости и т. д.), в связи с чем оценке подлежат ущерб, убытки, потери. Особое место среди перечисленных понятий занимает ущерб. Знания о нем необходимы для обоснования наиболее приоритетных направлений социально-экономического развития, оценки степени опасности тех или иных процессов, явлений, определения требуемого уровня экологической безопасности и т. д. На практике приходится встречаться с проблемой соотношения этих понятий. Анализ нормативно-правовых документов, научно-методических материалов свидетельствует о неоднозначности их содержательной трактовки, хотя от правильного толкования во многом зависят разработка оценочного методического инструментария и достоверность определения экономического ущерба (экономическая оценка последствий).

Авторы поддерживают использование трактовки ущерба в узком и широком смысле слова. В первом случае экономический ущерб характеризует собой вред, выраженный в стоимостной форме; в широком смысле слова экономический ущерб помимо денежного выражения вреда включает в себя упущенную выгоду и утрату материальных ценностей, определяемую как потери.

Результаты исследования

Достоверность оценки экономического ущерба требует четкого определения формирования структуры последнего. Обращение к работам исследователей [1–4] свидетельствует об однозначности взглядов в отношении формирования ущерба, величина которого характеризуется как сумма двух видов затрат: «затрат на предупреждение воздействия загрязненной среды на реципиентов и затрат, вызываемых воздействием на них загрязненной среды» [4]. При этом затраты на предупреждение воздействия загрязненной среды имеют место в том случае, когда возможна изоляция реципиентов от воздействия (сбор и захоронение отходов, разбавление сточных вод и кондиционирование воздуха, возведение противошумовых перегородок, вакцинация в момент эпидемии заболевания и т. д.), и осуществляются они после события, обусловившего появление потерь, вреда в результате антропогенных воздействий. В противном случае, например, при проектировании установки фильтров, увеличения высоты дымовых труб и т. д. предполагаемые затраты относятся к числу природоохранных затрат и в структуру экономического ущерба не включаются. Второй вид затрат обусловлен восстановлением потерь (потери продукции, потери здоровья, потери урожайности и др.) или замещением потерь при наличии адекватной замены.

При рассмотрении экономического ущерба в широком смысле слова в его составе подлежат учету убытки (упущенная выгода), т. е. ущерб, который связан с недополученным доходом, и потери. Стоимостная оценка упущенной выгоды выполняется в этом случае прямым счетом исходя из величины удельной прибыли, приходящейся на единицу потерь, или путем вычета из упущенной выручки себестоимости. Что касается потерь, то их формирование увязывается чаще всего с утратой материальных ценностей, а величина потерь определяется стоимостной величиной затрат, необходимых для компенсации порчи имущества [5].

По мнению авторов, целесообразным для оценки экономического ущерба в отношении биотических компонентов является использование методического подхода, базирующегося на снижении экономической ценности последних под влиянием антропогенных воздействий.

*✉ andrew428@rambler.ru
https://orcid.org/0000-0003-1803-739X

$$У_i = О_{i\times}\alpha, \quad (1)$$

где $У_i$ – экономический ущерб, обусловленный снижением экономической ценности *i*-го природного ресурса; $О_i$ – экономическая оценка *i*-го природного ресурса; α – коэффициент снижения экономической оценки *i*-го природного ресурса.

Примером использования данного подхода могут служить работы [3, 5]. Достоверность оценки в этом случае во многом зависит от обоснованности показателя α и экономической оценки природного ресурса. Опыт показывает, что снижение экономической ценности природного ресурса в определенной степени коррелируется со степенью нарушенности последнего. Согласно методическим рекомендациям [6], предлагается использование системы показателей, характеризующих последовательную смену экологических зон (таблица).

Как следует из таблицы, выделению подлежат четыре экологические зоны: с очень сильной, сильной, умеренной и слабой степенью нарушенности экосистем. Нарушенность усиливается по мере приближения к источнику антропогенного воздействия. На промплощадке степень нарушенности оценивается коэффициентом, равным 1,0, что означает гибель биоты. При расшифровке состояния нарушенности указывается, что на первом уровне нарушенности наблюдается угнетенное состояние большинства видов, но способность к самовосстановлению сохраняется полностью. На втором уровне отмечается снижение продуктивности и устойчивости флоры и фауны, а также повышение степени их нестабильности. Для третьего уровня характерны значительные потери продуктивности и устойчивости, а для четвертого – практически полная потеря продуктивности и устойчивости растительных и животных сообществ.

Подобный подход используется и авторами [5], которые выделяют три экологические зоны:

– участки экологического риска;

– участки экологического кризиса;

– участки экологического бедствия.

Рекомендуемые коэффициенты снижения экономической ценности при этом составляют соответственно: 0,1–0,4; 0,41–0,75; 0,76–1,0. Несколько иную интерпретацию нарушенности экосистем дают авторы [7], которые импактную зону характеризуют интегральным коэффициентом сохранности (ИКС), равным 20 % (α = 0,8), а буферную зону – интегральным коэффициентом сохранности 55 % (α = 0,45), для фоновой зоны α < 0,45, а ИКС > 55 %.

В работе [3] состав экологических зон увеличивается до пяти, рекомендуемые при этом коэффициенты снижения экономической ценности α составляют при изменении биоценоза:

– условно-фоновом – 0–0,099;

– удовлетворительном – 0,1–0,299;

– условно удовлетворительном – 0,3–0,639;

– критическом – 0,64–0,859;

– катастрофическом – 0,86–1,0.

Подтверждением сменяющих друг друга экологических зон с разной степенью нарушенности служит и работа [8], в которой предусматривается выделение пяти экологических зон со следующими значениями коэффициентов техногенных нарушений:

– неопасный уровень воздействия, состояние окружающей среды близко к фоновому, состояние рельефа, флоры, фауны и в целом ландшафта естественное или близко к естественному, α= 0,15;

– низкий уровень опасности воздействия, геологическая среда видоизменена незначительно, слабонарушенная, α = 0,15–0,3;

– средний уровень опасного воздействия, техногенные нарушения носят значительный характер, происходит видоизменение рельефа, угнетение фауны и флоры, в целом состояние оценивается как напряженное, α = 0,31–0,4;

– высокий уровень опасности воздействий, нарушения носят очень сильно преобразующий характер, геологическая среда сильно нарушена, флора и фауна почти полностью подавлены, состояние характеризуется как конфликтное, территория сильно нарушена, α = 0,41–0,6;

– весьма опасный (катастрофический) уровень воздействия, техногенные нарушения носят критический характер, рельеф полностью изменен, флора и фауна подавлены, территория в целом имеет вид пустынного ландшафта, α = 0,61–0,8 и более 0,8.

Коэффициенты снижения экономической ценности устанавливаются на основе экспертного опроса специалистов, имеющих опыт экологического зонирования. Их величина зависит от степени экологической опасности источников воздействия и устойчивости ландшафтов, воспринимающих воздействия, несомненную роль играет и фоновое состояние компонентов природной среды.

Значение коэффициента снижения экономической ценности природных ресурсов [6].
The value of the coefficient of decline in the economic value of natural resources [6].

Виды ресурсов	Степень нарушенности экосистем			
	Слабая (удовлетворительная)	Умеренная (условно удовлетворительная)	Сильная (кризисная)	Очень сильная (катастрофическая)
Лесные, дикорастущие, охотничьи, земельные	0,1–0,3	0,31–0,65	0,66–0,85	0,86–1,0

Не меньшую значимость имеет достоверность определения экономической оценки природных ресурсов. Обобщение и анализ методических подходов, используемых при экономической оценке, показывает их разнообразие. В числе рассматриваемых методических подходов: затратный и его модификации, доходный, рентный, рыночный и др. Считаем, что наиболее приемлемым в отношении биотических ресурсов является доходный [9, 10], который базируется на определении ожидаемых доходов от использования объекта оценки. В современных условиях задача экономической оценки природных ресурсов рассматривается в числе приоритетных задач государственной стратегии природопользования, ибо недооценка природно-ресурсного потенциала ведет к деградации последнего, к нарушению экологического баланса. Она необходима для «расширения потенциальных возможностей территории» [11], для сохранности ресурсов природы, в том числе экологических ресурсов (экосистемных услуг). В последнее время растет число исследований, посвященных экономический оценке экологической составляющей природного потенциала территории. При этом, помимо общеизвестных методов, авторы обращаются к таким методам, как:

– метод гедонистического ценообразования;

– метод транспортно-путевых затрат;

– метод теневых цен и др. [12–15].

Все большую значимость приобретает концепция общей экономической ценности, которая предусматривает определение стоимости использования (прямая стоимость использования, косвенная стоимость использования и стоимость отложенной альтернативы) и стоимости неиспользования (существования). Правда, на практике получает свое отражение лишь прямая стоимость использования и частично – косвенная стоимость использования. Попытки более детальной экономической оценки экосистемных услуг пока незначительны.

Ущерб, имеющий денежное выражение, относится к сфере экономических отношений, возникновение которых предопределяет наличие человека; только человек, воздействующий на компоненты природной среды с целью удовлетворения своих потребностей, может рассматриваться в качестве объекта возникновения экономического ущерба. При наличии экономических отношений вред, причиненный биоте (сельскохозяйственным культурам), оборачивается для них снижением урожайности, а для собственников – снижением объема реализации и потерей прибыли. Возможна и иная ситуация при загрязнении окружающей среды. При увеличении запыленности воздуха может ухудшиться качество выпускаемой продукции. Наносится вред промышленному производству, в итоге ухудшаются конечные финансовые показатели, т. е. причиняется экономический ущерб собственнику данного производства (рис. 1).

В свою очередь, при отсутствии экономических отношений вопрос об экономической оценке компонентов природной среды не поднимается, что исключает расчет экономического ущерба. Из сказанного ранее следует, что возникновение экономического ущерба предполагает:

– во-первых, формирование последствий, имеющих отрицательный характер в виде вреда, причиняемого реципиентом, воспринимающим воздействия;

– во-вторых, наличие экономических отношений, что обусловливает возможность расчета экономического ущерба;

– в-третьих, наличие объекта, которому причиняется экономический ущерб; в качестве объекта выступает человек, его сообщество, сфера его деятельности [1].

При оценке экономического ущерба требуется уточнение объекта, в отношении которого рассчитывается последний. В ряде случаев отсутствие подобного уточнения приводит к неточностям в определении величины экономического ущерба. Так, при расчете заболеваемости и смертности у населения под влиянием загрязнения окружающей среды экономический ущерб должен определяться в отношении нескольких объектов:

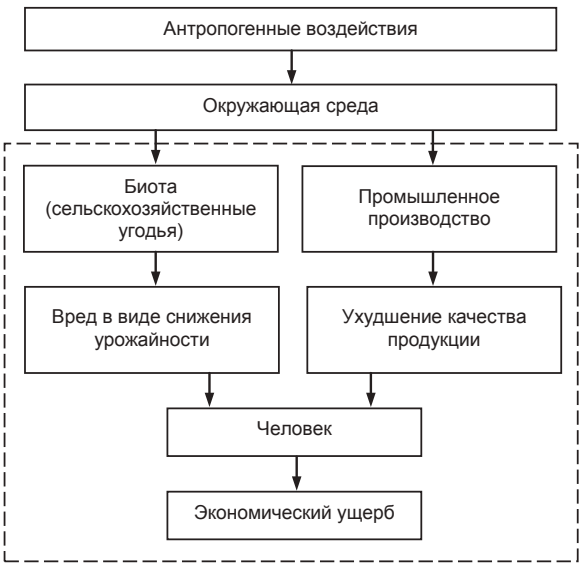


Рисунок 1. Формирование экономического ущерба.
Figure 1. The formation of economic damage.

– для самого заболевшего человека (дополнительные затраты на лечение, потери в заработной плате, причинение морального ущерба);

– для собственников предприятия, сотрудником которого является заболевший (упущенная выгода в виде потери прибыли);

– для сообщества людей в лице государства (затраты, связанные с лечением заболевшего, затраты на профилактику, затраты по выплате больничных, потери, обусловленные снижением налоговых выплат).

Выводы

Результатом исследования служат основополагающие принципы формирования и оценки экономического ущерба, которые сводятся к следующим:

1. Формирование ущерба предопределяет наличие последствий отрицательного характера, возникающих в результате антропогенного воздействия на окружающую среду.

2. Ущерб носит стоимостное выражение и относится к числу экономических категорий.

3. Экономический ущерб возникает только при наличии экономических отношений, возникновение которых обуславливает наличие человека, выступающего движущей силой формирования последних.

4. Экономический ущерб причиняется только человеку (сообществу людей, объекту (сфере) его деятельности), неживой природе, фауне и флоре наносится вред.

5. Экономический ущерб в широком смысле слова может выступать в виде денежного выражения вреда, в виде упущенной выгоды, в виде стоимостного выражения порчи материальных ценностей.

6. Результаты оценки экономического ущерба во многом определяет достоверностьустановления размера вреда, который находится в прямой зависимости от экологической опасности объекта воздействия, от устойчивости объектов, воспринимающих воздействия, от экономической оценки природных ресурсов, которым причиняется вред, от сметной стоимости материальных ценностей, которым наносятся повреждения, от половозрастных характеристик человека, здоровью которого причиняется вред.

7. Методы оценки экономического ущерба при всем их многообразии признаны научной общественностью и могут использоваться в любом их сочетании.

8. Долгосрочность проявления отрицательных последствий предопределяет решение задачи относительно целесообразности учета фактора времени при оценке экономического ущерба и обоснования ставки дисконта.

9. Экономический ущерб, представляет собой комплексную величину и включает в себя составляющие, каждая из которых характеризует частную величину экономического ущерба, причиняемого отдельным объектам, в роли которых может выступать собственник природных ресурсов, природопользователь, население территории, в рамках которой расположен природно-ресурсный потенциал, и др.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тулупов А. С. Теория ущерба. Общие подходы к вопросам создания методического обеспечения. М.: Наука, 2009. 284 с.
2. Рюмина Е. В. Экономический анализ ущерба от экологических нарушений. М.: Наука, 2009. 331 с.
3. Косолапов О. В. Обеспечение эколого-экономической устойчивости при недропользовании. Абакан: Изд-во ХГУ, 2016. 280 с.
4. Временная типовая методика определения экономической эффективности осуществления природоохранных мероприятий и оценки экономического ущерба, причиняемого народному хозяйству загрязнением окружающей природной среды. М.: Экономика, 1986. 95 с.
5. Пахомов В. П., Игнатьева М. Н., Беляев В. Н. и др. Методические материалы по взаимоотношениям коренных малочисленных народов Севера с хозяйствующими субъектами. Екатеринбург: Ин-т экономики УрО РАН, 2000. 63 с.
6. Игнатьева М. Н., Литвинова А. А., Логинов В. Г. Методический инструментарий экономической оценки последствий воздействия горнопромышленных комплексов на окружающую среду. Екатеринбург: Ин-т экономики УрО РАН, 2010. 168 с.
7. Бутусов О. Б., Степанов А. М. Экологическое зонирование лесов вокруг источников химического загрязнения // Экология и промышленность России. 2002. С. 30–33.
8. Каренов Р. С. Пути улучшения экологической обстановки в области добычи и переработки руд черных и цветных металлов, урановых руд // Вестник КарГУ. 2011. № 1 (61). С. 57–67.
9. Балашенко В. В., Игнатьева М. Н., Логинов В. Г. Природно-ресурсный потенциал северных регионов: методические особенности комплексной оценки // Экономика региона. 2015. № 4. С. 84–94.
10. Развитие системности в освоении природного потенциала северных малоизученных территорий / под ред. А. И. Татаркина. Екатеринбург: Ин-т экономики УрО РАН, 2015. 317 с.
11. Лукьянчиков Н. И., Потравный И. М. Экономика и организация природопользования. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2007. 591 с.
12. Глазырина И. П. Природный потенциал в экономике переходного периода. М.: НИА – Природа, РЭ ФИА, 2001. 204 с
13. Бобылев С. Н., Захаров В. М. Экосистемные услуги и экономика. М.: ООО «Типография ЛЕВКО», Институт устойчивого развития, Центр экологической политики России, 2009. 72 с.
14. Экономическая оценка биоразнообразия / под ред. С. Н. Бобылева, А. А. Тишкова. М., 1999. 112 с.
15. Фоменко Г. А., Фоменко М. А., Михайлова А. В. и др. Экономическая оценка особо охраняемых природных территорий Камчатки: практические результаты и их значение для сохранения биоразнообразия (на примере природного парка «Быстринский»). Ярославль: АНО НИПИ «Кадастр», 2010. 155 с.

Статья поступила в редакцию 06 июня 2019 г.

УДК 330.15 https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-3-157-161

Methodological provisions of the formation and evaluation economic disbenefit

Andrey Nikolaevich IVANOV*

Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia

Relevance. Justification of the most priority areas of socio-economic development, evaluation of hazard rate for occurring phenomena and processes; determination the necessary level of environmental hazard require information on economic disbenefit caused by the formation of consequences under the influence of anthropogenic influences.
Purpose of research – clarification of the definition of economic damage, the formation of its structure, the identification of objects in relation to which the economic damage is evaluated, the substantiation of the fundamental principles of its formation and assessment.
Results and their application. In the process of the study, the definition of damage was clarified in relation to the concept of lost profit and losses, the use of the interpretation of damage in the broad and narrow sense of the word is recommended. The structure of the formation of economic damage is determined, the feasibility of resorting to a methodological approach to evaluating the reduction in economic value when identifying the amount of economic damage in biota, which is already used by a number of researchers, is proved. The reliability of the assessment in this case depends largely on the validity of the coefficient of economic value reduction α and the economic valuation of the resource for which economic damage is calculated. The generalization and analysis of the studies showed that their authors recommend the allocation of 3-5 ecological zones, for each of which a coefficient α or an integral safety coefficient (ICS) is proposed, which has the exact opposite value with respect to α. There are studies detailing α, but they have been distinguished by a rather high complexity of calculations. In the economic evaluation of natural resources, the whole set of methodological approaches is used. Currently, many studies focused on the economic valuation of ecosystem services are characterized. It is supposed to consider economic damage as a complex value, consisting of private economic damage caused to the owner of the resources, the user of the resources, and when assessing the economic damage to ecosystem services to the world community, etc. The fundamental principles of the formation of economic damage and its assessment, which can serve as the basis for research on the subject under consideration, are determined.

Keywords: harm, structure, principles, resource approach, economic evaluation, economic damage.

REFERENCES

1. Tulupov A. S. 2009, *Teoriya ushcherba. Obshchiye podkhody k voprosam sozdaniya metodicheskogo obespecheniya* [Theory of damage. General approaches to the creation of methodological support]. Moscow, 284 p.
2. Ryumina Ye. V. 2009, *Ekonomicheskiy analiz ushcherba ot ekologicheskikh narusheniy* [Economic analysis of damage from environmental violations]. Moscow, 331 p.
3. Kosolapov O. V. 2016, *Obespecheniye ekologo-ekonomicheskoy ustoychivosti pri nedropol'zovanii* [Ensuring ecological and economic sustainability in subsoil use]. Abakan, 280 p.
4. 1986, *Vremennaya tipovaya metodika opredeleniya ekonomicheskoy effektivnosti osushchestvleniya prirodookhrannykh meropriyatiy i otsenki ekonomicheskogo ushcherba, prichinyayemogo narodnomu khozyaystvu zagryazneniyem okruzhayushchey* [Temporary standard methodology for determining the economic efficiency of environmental protection measures and assessing the economic damage caused to the national economy by environmental pollution]. Moscow, 95 p.
5. Pakhomov V. P., Ignat'yeva M. N., Belyayev V. N. et al. 2000, *Metodicheskiye materialy po vzaimootnosheniyam korennykh malochislennykh narodov Severa s khozyaystvuyushchimi sub"yektami* [Methodological materials on the relationship of the indigenous peoples of the North with business entities]. Ekaterinburg, 63 p.
6. Ignat'yeva M. N., Litvinova A. A., Loginov V. G. 2010, *Metodicheskiy instrumentariy ekonomicheskoy otsenki posledstviy vozdeystviya gorno-promyshlennykh kompleksov na okruzhayushchuyu sredu* [Methodological tools for economic assessment of the environmental impacts of mining complexes]. Ekaterinburg, 168 p.
7. Butusov O. B., Stepanov A. M. 2002, Ecological zoning of forests around sources of chemical pollution. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and industry of Russia], pp. 30–33. (*In Russ.*)
8. Karenov R. S. 2011, Ways to improve the environmental situation in the field of mining and processing of ores of ferrous and non-ferrous metals, uranium ores. *Vestnik KarGU* [Bulletin of the University of Karaganda], no. 1 (61), pp. 57–67. (*In Russ.*)
9. Balashenko V. V., Ignatyeva M. N., Loginov V. G. 2015, Natural-resource potential of the northern regions: methodological features of a comprehensive assessment. *Ekonomika regiona* [The economy of the region], no. 4, pp. 84–94. (*In Russ.*)
10. Tatarkin A. I. 2015, *Razvitiye sistemnosti v osvoyenii prirodnogo potentsiala severnykh maloizuchennykh territoriy* [Systematic development in the development of natural potential of the northern poorly studied territories]. Ekaterinburg, 317 p.
11. Luk'yanchikov N. I., Potravnyy I. M. 2007, *Ekonomika i organizatsiya prirodopol'zovaniya* [Economics and organization of environmental management]. Moscow, 591 p.
12. Glazyrina I. P. 2001, *Prirodnyy potentsial v ekonomike perekhodnogo perioda* [Natural potential in the transition economy]. Moscow, 204 p.
13. Bobylev S. N., Zakharov V. M. 2009, *Ekosistemnyye uslugi i ekonomika* [Ecosystem Services and Economics]. Moscow, 72 p.
14. 1999, *Ekonomicheskaya otsenka bioraznoobraziya* [Economic evaluation of biodiversity], ed. By S. N. Bobyleva, A. A. Tishkova. Moscow, 112 p.
15. Fomenko G. A., Fomenko M. A., Mikhaylova A. V. et al. 2010, *Ekonomicheskaya otsenka osobo okhranyayemykh prirodnykh territoriy Kamchatki: prakticheskiye rezul'taty i ikh znacheniye dlya sokhraneniya bioraznoobraziya (na primere prirodnogo parka «Bystrinskiy»)* [Economic assessment of specially protected natural areas of Kamchatka: practical results and their significance for biodiversity conservation (using the Bystrinsky natural park as an example). Yaroslavl',155 p.

The article was received on June 06, 2019

*✉ andrew428@rambler.ru
https://orcid.org/0000-0003-1803-739X

УДК [622.272.06:622.341]:519.001.57:504.06 https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-3-162-170

Исследование эколого ориентированной подземной геотехнологии добычи и переработки железных руд на основе экономико-математического моделирования

Игорь Владимирович СОКОЛОВ*,
Николай Васильевич ГОБОВ**,
Юрий Михайлович СОЛОМЕИН***

Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург

Введение. Изложены результаты исследования эколого-ориентированной комплексной подземной геотехнологии добычи и переработки железных руд. Она разработана в рамках геотехнологической стратегии, целью которой является повышение экономической эффективности и экологической безопасности освоения железорудных месторождений, а путем достижения цели – применение систем разработки разных классов в одном шаге освоения (вскрытия и отработки) месторождения и перенос процесса обогащения в подземные условия.
Методология исследования. Произведены экономико-математическое моделирование разработанных вариантов геотехнологической стратегии и их оценка по предложенному комплексному эколого-экономическому критерию, учитывающему степень замкнутости горнотехнической системы и величину чистого дисконтированного дохода.
Результаты исследования. Параллельное применение систем с обрушением для разработки верхних этажей и систем с закладкой – нижних этажей – позволяет не только увеличить производственную мощность рудника до двух раз, но и обеспечить замкнутость формируемой горнотехнической системы за счет использования отходов горно-обогатительного производства в качестве закладки. Перенос процесса обогащения под землю позволяет многократно сократить площадь земельного отвода предприятия, выдавать на поверхность только концентрат и излишки хвостов обогащения, что значительно повышает экологическую безопасность горно-обогатительного производства. Кроме этого, формирование подземного обогатительного комплекса, включающего стадии дробления, измельчения и обогащения руды, вблизи зоны ведения очистных работ на безопасном расстоянии позволяет исключить некоторые присущие традиционной технологии процессы (транспортирование горной массы до ствола, ее перегрузку и подъем на поверхность, обратную подачу отходов обогащения в виде закладочного материала в шахту), а следовательно, получить экономический эффект.
Выводы. Технико-экономическое сравнение показало, что вариант геотехнологической стратегии с подземным обогатительным комплексом является вполне конкурентоспособным при условии, что срок его строительства не превышает срока строительства всех горно-капитальных, горно-подготовительных и нарезных выработок, необходимых для ввода рудника в эксплуатацию.

Ключевые слова: железорудное месторождение, подземная геотехнология, геотехнологическая стратегия, горнотехническая система, подземный обогатительный комплекс, чистый дисконтированный доход, экономико-математическое моделирование.

Перед современной мировой горнодобывающей промышленностью стоят две серьезные проблемы: удовлетворение постоянно растущего спроса на полезные ископаемые при практической невозобновляемости минеральных ресурсов; сохранение экологического баланса в геосферах Земли и уменьшение вредного влияния на окружающую среду при огромных объемах извлекаемых из недр и перерабатываемых горных масс имеющимися технологиями. Разработка месторождения в экологическом плане всегда представляет собой развитие во времени и пространстве природно-технической системы, в которой обе составляющие находятся в антагонистическом противоречии, при этом все экологические ограничения определяются законами развития природы, а возможности выполнения этих ограничений связаны с особенностями и свойствами применяемых геотехнологий [1–7].

Отработка открытым способом крупных железорудных месторождений в сочетании с традиционным размещением обогатительных фабрик на поверхности Земли характеризуется чрезвычайно негативным воздействием на окружающую среду. Переход на более экологически безопасный подземный способ разработки резко снижает техногенную нагрузку на природную среду и актуализирует постановку вопроса о целесообразности размещения под землей подземных обогатительных комплексов (ПОК).

Наиболее перспективным и признанным подходом к решению эколого ориентированных задач является создание новых производств и объектов в соответствии с принципом «более чистого производства» (Cleaner Production), акцентирующимся не на очистке и обезвреживании образовавшихся отходов, а на уменьшении их объемов и степени опасности [8, 9]. При подземной разработке железорудных месторождений в наибольшей степени данному принципу соответствует восходящий способ выемки руды с закладкой выработанного пространства. Кроме этого, поскольку при подземном способе разработки одним из главных факторов, определяющих степень негативного воздействия на окружающую среду, является работа обогатительных фабрик с входящими в их состав хвостохранилищами, транспортными системами, очистными сооружениями, то размещение обогатительных комплексов под землей нейтрализует данный фактор. За рубежом имеется опыт подземного обогащения руды, в отечественной практике ПОК не применяются.

Объектом исследования данной статьи выступает эколого ориентированная комплексная технология добычи и переработки железных руд на основе ПОК. Сочетание подземного обогащения с восходящим способом отработки месторождения создает предпосылки для формирования безотходной технологии добычи и переработки железных руд

* ✉ geotech@igduran.ru
https://orcid.org/0000-0001-7841-5319
** igeotech910@igduran.ru
https://orcid.org/0000-0002-1198-3300
*** geotech@igduran.ru
https://orcid.org/0000-0002-8226-6494

Таблица 1. Варианты ГС освоения нижних горизонтов Естюнинского месторождения.
Table 1. Geotechnological strategy options for developing the lower horizons of the Estyuninskoye field.

Варианты ГС	Порядок развития горных работ		Система разработки	Расположение ОК	Способ погашения выработанного пространства и место утилизации отходов ГОП
Производственная мощность шахты 2,5 млн т					
1	Последовательный нисходящий одноэтажный		Камерная с последующим обрушением целиков	На земной поверхности	Обрушенными породами. На поверхности
2	Последовательный восходящий одноэтажный		Камерная с закладкой	На земной поверхности	Закладкой. Выработанное пространство камер
3	Последовательный восходящий одноэтажный		Камерная с закладкой	Под землей	Закладкой. Выработанное пространство камер
Производственная мощность шахты 5 млн т					
4	Параллельный комбинированный многоэтажный	Верхние этажи – нисходящий	Камерная с последующим обрушением целиков	На земной поверхности	Камеры верхних этажей – обрушенными породами
		Нижние этажи – восходящий	Камерная с закладкой		Камеры нижних этажей – закладкой
5	Параллельный комбинированный многоэтажный	Верхние этажи – нисходящий	Камерная с последующим обрушением целиков	Под землей	Камеры верхних этажей – обрушенными породами
		Нижние этажи – восходящий	Камерная с закладкой		Камеры нижних этажей – закладкой

с полной утилизацией отходов горно-обогатительного производства (ГОП) в недрах Земли и выдачей на поверхность только его продукта – концентрата.

На примере нового шага освоения (вскрытия и отработки) глубоких горизонтов (–240 м/–640 м) Естюнинского месторождения разработаны и оценены варианты геотехнологической стратегии (ГС), табл. 1. В основу ГС кроме приведенных принципов положена концепция восполнения выбывающих мощностей Высокогорского ГОКа за счет увеличения производительности шахты Естюнинская от 2,5 до 5 млн т руды в год. Вскрытие осуществляется вертикальными стволами (скиповым, клетевым и вентиляционными) и этажными квершлагами через 100 м по высоте (гор. –340 м, –440 м, –540 м, –640 м). Сконструированы соответствующие вариантам ГС технологические схемы, различающиеся по признакам: производственная мощность шахты; порядок отработки этажей во времени и в пространстве; система разработки; место расположения обогатительного комплекса (ОК); способ погашения камер; место утилизации отходов ГОП (порода от проходки и хвосты обогащения). На рис. 1 показаны технологические схемы вариантов 4(а) и 5(б) ГС.

Место положения ПОК, его состав и соответственно конструкция определяются следующим [10–12]:

– располагается вблизи зоны ведения очистных работ на минимальном безопасном расстоянии с учетом схемы и способа вскрытия;

– включает в себя стадии дробления, измельчения и обогащения руды – сухой и мокрой магнитной сепарации (СМС и ММС), сушки концентрата, приготовления закладки из хвостов;

– производительность и технологический состав должны соответствовать производственной мощности шахты и качеству поступающей руды как с верхних этажей, разрабатываемых системами с обрушением, так и с нижних этажей, разрабатываемых с закладкой;

– оптимизируется совместно с транспортной схемой перемещения грузов: руды от добычных горизонтов до приемных бункеров по рудоспускам, хвостов СМС и (или) ММС от ПОК до закладываемых камер, концентрата – на поверхность. Перспективным является трубопроводный транспорт хвостов и концентрата с применением насосов фирмы Putzmeister [13, 14];

– использование сил гравитации в процессе стадиального обогащения руды за счет вертикальной компоновки.

Вся добытая руда как с верхних этажей, разрабатываемых системами с обрушением, так и с нижних этажей, разрабатываемых с закладкой, перепускается под действием силы тяжести к ПОК, далее руда дробится, измельчается и обогащается. Рудоспуски с добычных горизонтов до ПОК располагаются за зоной сдвижения пород лежачего бока от отработки самого нижнего этажа. Хвосты обогащения после приготовления из них закладочного материала транспортируются от ПОК на закладочные горизонты нижних этажей и размещаются в отработанных камерах. Концентрат по квершлагам и стволу выдается на поверхность. В горизонтальной плоскости оптимальным является расположение ПОК по центру тяжести всех запасов в шаге освоения.

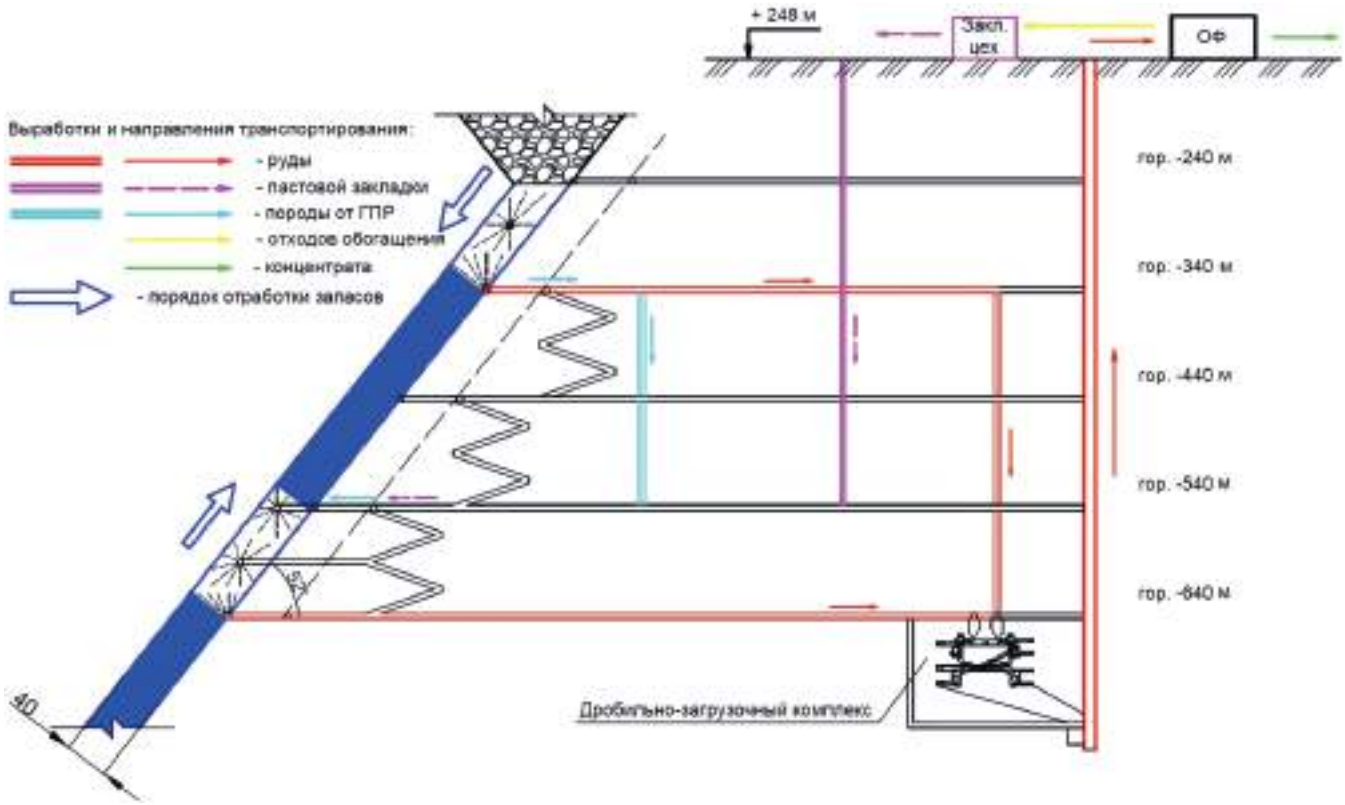
Таким образом, устраняются недостатки традиционной технологии добычи и переработки рудного сырья – транспортирование горной массы до ствола, перегрузочные процессы, подъем на поверхность и обратная подача отходов обогащения в виде закладочного материала в шахту.

Оптимальное место расположения ПОК в шаге освоения глубоких горизонтов (–240 м/–640 м) в вертикальной плоскости установлено по критерию минимума суммарных приведенных капитальных затрат на вскрытие и эксплуатационных затрат на транспортирование руды, породы, хвостов обогащения и концентрата в зависимости от применяемого вида и схемы транспорта [15, 16].

В зависимости от вида перемещения различных грузов разработаны следующие транспортные схемы шахты:

а) руда из добычных блоков до рудоспусков или до приемного бункера ПОК доставляется автосамосвалом MT436LP

а



б

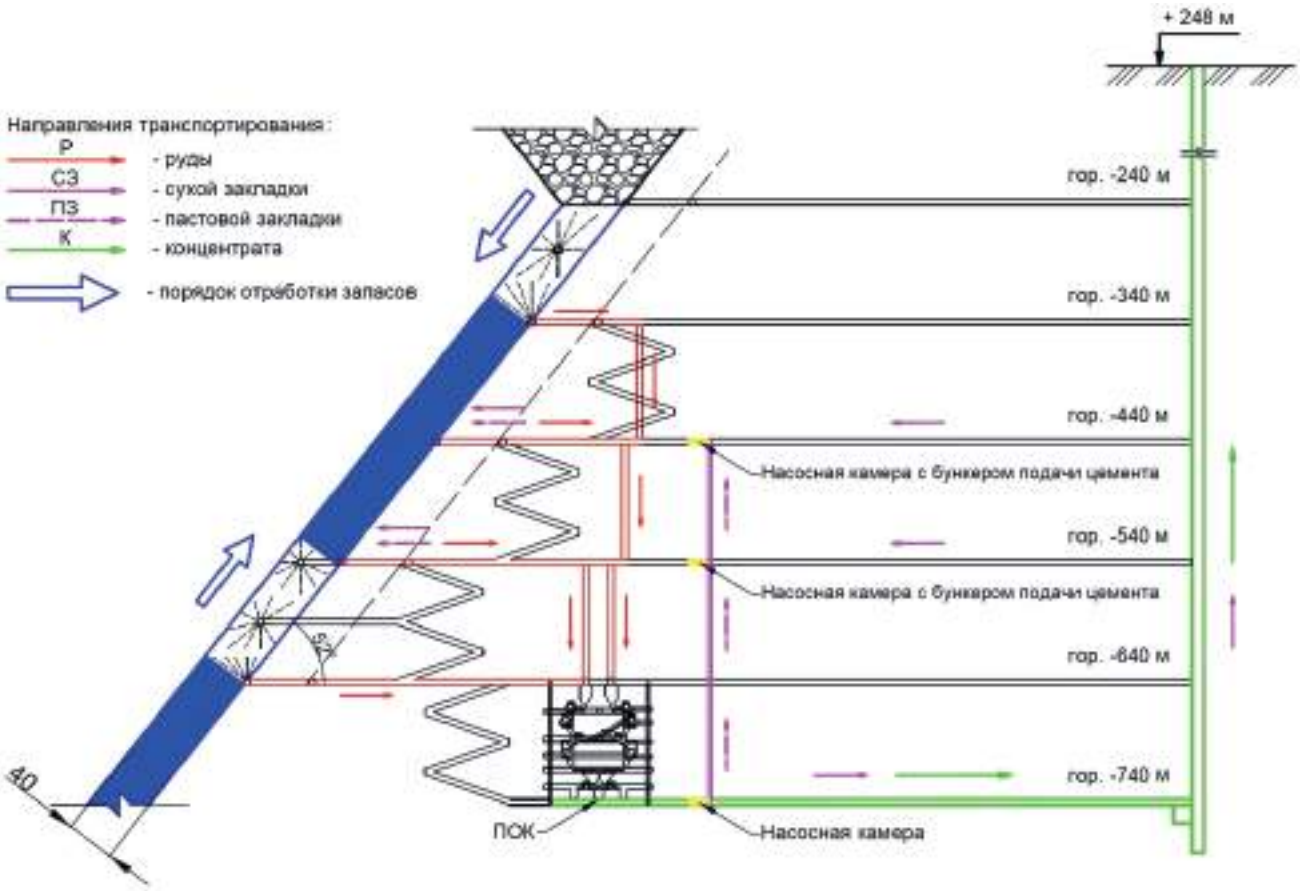


Рисунок 1. Технологические схемы вариантов 4 (а) и 5 (б) ГС освоения Естюнинского месторождения.
Figure 1. Technological schemes of options 4 (a) and 5 (b) GS for the development of the Estyuninskoye field.

грузоподъемностью 35 т; порода из проходческих забоев до закладываемых камер – ПДМ типа ST14 грузоподъемностью 14 т; сухая закладка (хвосты СМС) от ПОК до закладываемых камер – автосамосвалом MT436LP; гидравлическая закладка (хвосты ММС) от ПОК до закладываемых камер – по трубам; концентрат от ПОК до ствола на горизонте –340 м – конвейером по уклону (схема А35 + КУ);

б) отличается от схемы 1 тем, что концентрат от ПОК до ствола транспортируется электровозом 14КР 2А в вагонетках ВГ-10 (схема А35 + ЖД);

в) руда по откаточным горизонтам до капитальных рудоспусков, пройденных в ПОК, доставляется электровозом 14КР 2А в вагонетках ВГ-10; порода из проходческих забоев до закладываемых камер – ПДМ типа ST 14; сухая закладка (хвосты СМС) от ПОК до ствола электровозом 14КР 2А – в вагонетках ВБ-4, подъем – по стволу до закладочного горизонта, транспорт от ствола до добычных блоков – электровозом 14КР 2А; гидравлическая закладка (хвосты ММС) от ПОК до закладываемых камер – по трубам; концентрат от ПОК до ствола – электровозом 14КР 2А в вагонетках ВГ-10 (схема ЖД + ЖД).

Результаты моделирования показали, что оптимальным в вертикальной плоскости является расположение приемных выработок ПОК на уровне нижнего добычного горизонта, в данном случае на гор. –640 м. Среди сравниваемых транспортных схем наиболее экономичной является ЖД + ЖД (рис. 2).

Методика оценки и выбора вариантов ГС в шаге освоения месторождения учитывает комплекс как производственного, так и экологического эффектов от реализации стратегических решений [17]. Для всесторонней оценки вариантов ГС применяется комплексный эколого-экономический критерий. Для оценки экономического эффекта в качестве критерия принят максимум чистого дисконтированного дохода (ЧДД), учитывающий динамику развития образованной горнотехнической системы (ГТС) во времени, записанный в следующем виде, руб.:

$$\text{ЧДД} = (\sum \text{Ц}_{it} - \sum K_{it} - \sum \text{Э}_{it} - \sum \text{СЭП}_{it}) / (1+E)^t \to \max,$$

где Ц_{it} – доход от реализации продукции, получаемый в t-м году реализации i-го варианта ГС, руб./год; K_{it} – капитальные затраты на строительство шахты и ОК в t-м году реализации i-го варианта ГС, руб./год; Э_{it} – эксплуатационные затраты на процессы добычи и обогащения руды в t-м году реализации i-го варианта ГС, руб./год; СЭП_{it} – денежная оценка социально-экологических последствий от реализации i-го варианта ГС, руб./год; E – норма дисконта, доли ед.; t – изменяется в пределах от 0 до T, равного времени строительства шахты и отработки запасов в новом шаге.

Для оценки экологического эффекта от реализации ГС производилась оценка способности ее вариантов (табл. 1) утилизировать внутри себя образованные отходы. Показатель замкнутости ГТС η – это количественное выражение экологичности ГТС, который равен отношению суммарного объема отходов $V^{\text{о}}$ к объему пустот $V^{\text{п}}$, образующихся и закладываемых в рамках ГТС

$$\eta = V^{\text{о}} / V^{\text{п}} \to 1.$$

Если $0 \le \eta \le 1$, то ГТС замкнута, если $\eta > 1$, то ГТС не замкнута.

Для выбора лучшего варианта ГС выдвинут комплексный эколого-экономический критерий в виде глобального критерия принятия компромиссного решения R, рассчитываемого как минимум суммы баллов по обоим критериям с учетом их веса

$$R = k_{\text{ЧДД}} r_{\text{ЧДД}} + k_{\eta} r_{\eta} \to \min,$$

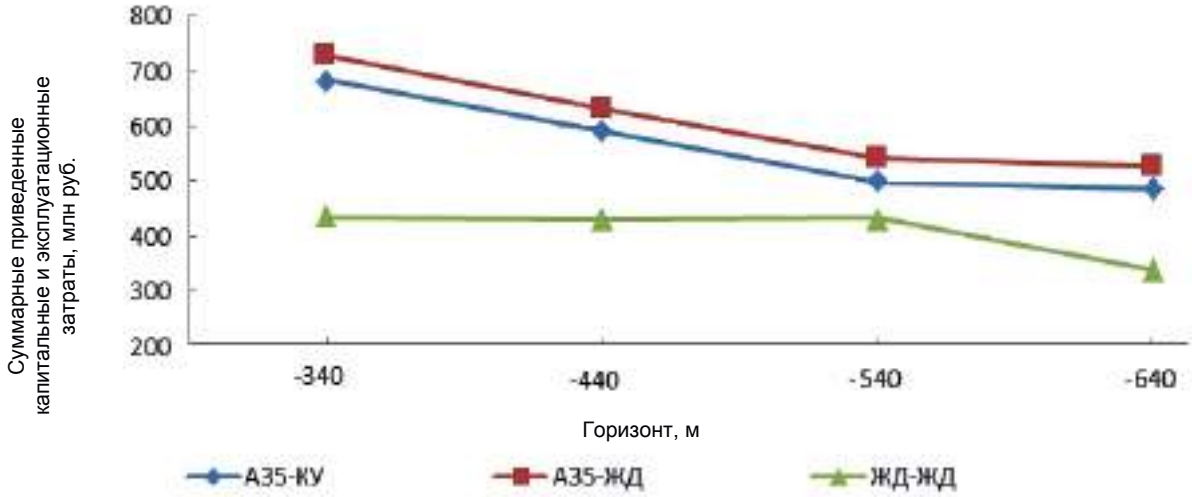


Рисунок 2. Зависимость суммарных приведенных капитальных и эксплуатационных затрат на транспортирование грузов от высотного расположения ПОК.

Figure 2. The dependence of the total reduced capital and operating costs on transportation of goods from the high-altitude location of the underground mineral processing complex.

где $r_{ЧДД}$, r_{η} – рейтинг по критерию ЧДД и η соответственно. Более высокий рейтинг (минимальное количество баллов) получает вариант ГС с лучшим значением критерия; $k_{ЧДД}$, k_{η} – вес критериев ЧДД и η в глобальном критерии. Поскольку данные веса относятся к взаимно противоположным критериям, то в соответствии с императивом Cleaner Production можно принять их равноправными, например равными 1.

Следующим этапом стало экономико-математическое моделирование (ЭММ) вариантов ГС освоения нижних горизонтов Естюнинского железорудного месторождения. Для этого была написана компьютерная программа в приложении Excel пакета программ Microsoft Office. Для расчета технико-экономических показателей по вариантам ГС требуется весьма большой массив исходных данных – более 200 горно-геологических, горнотехнических, экономических параметров. По каждому из двух критериев варианту ГС присваивается рейтинг $r_{ЧДД}$ и r_{η}. Более высокий рейтинг (минимальное количество баллов) получает вариант с лучшим значением критерия. Выручаемый при освоении нового шага ЧДД приведен на рис. 3, показатели и рейтинги по вариантам ГС – в табл. 2.

Результаты ЭММ показали, что по комплексному эколого-экономическому критерию наиболее эффективными являются варианты 2 и 4 ГС. Несмотря на уступающий в 2 раза показатель замкнутости у варианта 4 ГС, его ЧДД по сравнению с вариантом 2 ГС лучше в 3,4 раза. Однако у варианта 2 ГС производственная мощность в 2 раза ниже, а срок освоения и срок окупаемости капитальных вложений соответственно в 1,6 и 1,3 раза больше.

Относительно варианта 5 ГС можно сказать, что при экологической эффективности, равной варианту 4 ГС, экономическая в 1,4 раза ниже, а срок строительства рудника большего почти в 2 раза больше (14 и 8 лет соответственно) из-за более длительного времени строительства ПОК. Исходя из принципа Cleaner Production, считаем необходимым выполнить модернизацию варианта 5 ГС по следующим направлениям:

1) сокращение срока строительства ПОК за счет организации его первоочередного вскрытия;
2) оптимизация конструкции ПОК за счет использования сил гравитации при строительстве и эксплуатации;
3) применение методов очистной выемки при проходке камерных выработок ПОК;
4) использование вскрывающих и подготовительных выработок ПОК для выдачи концентрата на поверхность.

Таблица 2. Показатели и рейтинги вариантов ГС.
Table 2. Indicators and ratings of geotechnological strategy options.

Показатель	Вариант				
	1	2	3	4	5
Показатель замкнутости ГТС, доли ед.	∞	1,43	1,43	2,85	2,85
Рейтинг по критерию η, баллы	5	1	1	3	3
ЧДД, млн руб.	1695	2702	456	9121	6564
Рейтинг по критерию ЧДД, баллы	4	3	5	1	2
Комплексный эколого-экономический критерий, баллы	9	4	6	4	5
Итоговое место варианта ГС в рейтинге	5	1	4	1	3

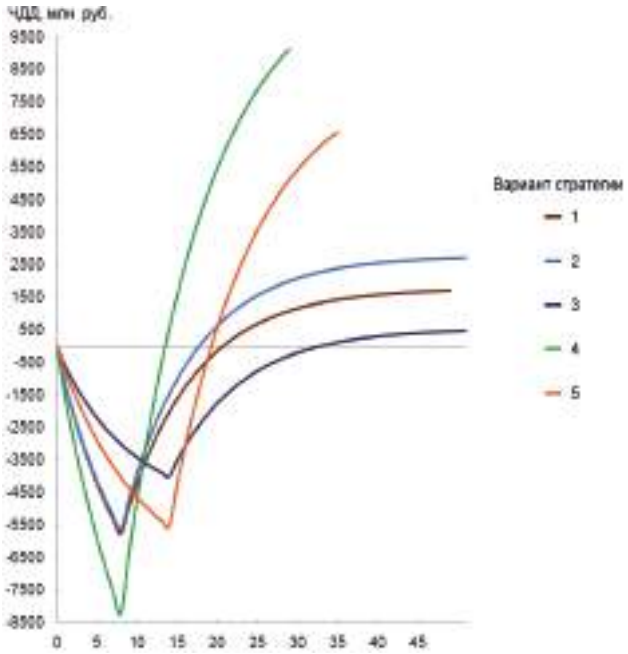


Рисунок 3. ЧДД и сроки освоения по вариантам ГС.
Figure 3. NPV and terms of development for the options of geotechnological strategy.

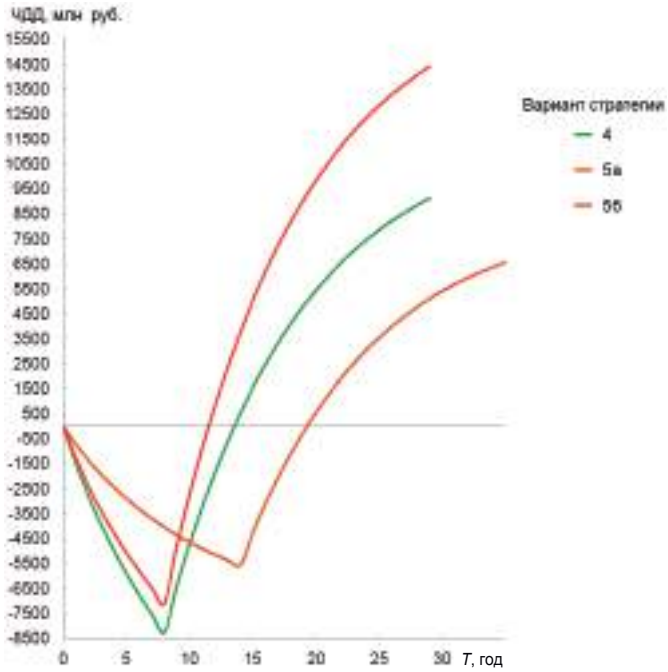


Рисунок 4. ЧДД и сроки освоения по вариантам 4, 5а и 5б ГС.
Figure 4. NPV and timing of development for options 4, 5a and 5b, geotechnological strategy.

Таблица 3. Показатели и рейтинги вариантов ГС.
Table 3. Indicators and ratings of geotechnological strategy options.

Показатель	Вариант		
	4	5а	5б
Показатель замкнутости ГТС, доли ед.	2,85	2,85	2,85
Рейтинг по критерию η, баллы	1	1	1
ЧДД, млн руб.	9121	6564	14 402
Рейтинг по критерию ЧДД, баллы	2	3	1
Комплексный эколого-экономический критерий, баллы	3	4	2
Итоговое место варианта ГС в рейтинге	2	3	1

Рассмотрено два подварианта варианта 5 ГС, отличающихся сроком строительства ПОК в рамках общего срока строительства рудника – больше срока строительства всех горно-капитальных, горно-подготовительных и нарезных выработок, необходимых для ввода рудника в эксплуатацию (5а) и не превышающих его (5б). Вариант 5а фактически соответствует ранее рассмотренному варианту 5 ГС. Графики ЧДД для сравниваемых вариантов 4, 5а и 5б ГС приведены на рис. 4.

Результаты ЭММ показали, что вариант 5б ГС является оптимальным – при равенстве по показателю замкнутости он занимает первое место по критерию ЧДД, прежде всего за счет равенства срока строительства ПОК сроку строительства ОК на поверхности (вариант 4 ГС). При этом сокращены сечения ствола, околоствольных дворов и исключены выработки и процессы, присущие традиционной технологии, а также площади земель, занимаемые ОК, отвалами и шламохранилищами на поверхности.

Таким образом, определены необходимые условия эффективности применения ПОК:

1. Срок строительства рудника с ПОК должен быть не больше срока строительства традиционного рудника с ОК на поверхности:

$$T_{\text{вскр}}^{\text{ПОК}} + T_{\text{ГПР}}^{\text{ПОК}} + T_{\text{ПНР}}^{\text{ПОК}} + T_{\text{ПОК}} \le T_{\text{вскр}}^{\text{ОК}} + T_{\text{ГПР}}^{\text{ОК}} + T_{\text{ПНР}}^{\text{ОК}} + T_{\text{ОК}},$$

где $T_{\text{ПОК}}$, $T_{\text{ОК}}$ – время строительства ПОК и ОК, соответственно, лет; $T_{\text{вскр}}^{\text{ПОК}}$, $T_{\text{ГПР}}^{\text{ПОК}}$, $T_{\text{ПНР}}^{\text{ПОК}}$ – время строительства вскрывающих, горно-подготовительных и нарезных выработок, необходимых для ввода в эксплуатацию рудника с ПОК, лет; $T_{\text{вскр}}^{\text{ОК}}$, $T_{\text{ГПР}}^{\text{ОК}}$, $T_{\text{ПНР}}^{\text{ОК}}$ – время строительства вскрывающих, горно-подготовительных и нарезных выработок, необходимых для ввода в эксплуатацию рудника с ОК, лет.

2. Срок строительства ПОК должен быть не больше срока строительства всех горно-капитальных, горно-подготовительных и нарезных выработок, необходимых для ввода рудника в эксплуатацию:

$$T_{\text{ПОК}} \le T_{\text{вскр}}^{\text{ПОК}} + T_{\text{ГПР}}^{\text{ПОК}} + T_{\text{ПНР}}^{\text{ПОК}}.$$

3. Строительство ПОК должно осуществляться в рамках единой схемы вскрытия и одновременно со строительством всех горно-капитальных, горно-подготовительных и нарезных выработок, необходимых для ввода рудника в эксплуатацию.

Проведенные исследования показывают, что разработанная эколого ориентированная комплексная технология добычи и переработки железных руд на основе ПОК способна не только снизить экологическую нагрузку на окружающую среду, но и в определенных условиях повысить экономический эффект при отработке железорудных месторождений. Перспективы промышленного внедрения данной технологии связаны с освоением глубоких горизонтов Ново-Естюнинского и Северо-Гороблагодатского железорудных месторождений, а также Тарыннахско-Горкитского железорудного узла. Актуальность разработанной геотехнологии подчеркивается существенным увеличением в ближайшие годы затрат на экологические аспекты освоения месторождений (приобретение земли по нормативу в зависимости от кадастровой стоимости, плата за перевод в категорию промышленного назначения, налог на землю, плата за размещение отходов на поверхности и др.).

Работа выполнена при поддержке Комплексной программы фундаментальных исследований УрО РАН (Проект 18-5-5-10).

ЛИТЕРАТУРА

1. Трубецкой К. Н., Галченко Ю. П. Геоэкология освоения недр и экогеотехнологии разработки месторождений. М.: Научтехлитиздат, 2015. 360 с.
2. Трубецкой К. Н., Галченко Ю. П. Природоподобные горные технологии – перспектива разрешения глобальных противоречий при освоении минеральных ресурсов литосферы // Вестник РАН. 2017. Т. 87, № 7. С. 655–662.
3. Trubetskoy K. N., Kaplunov D. R., Ryl'nikova M. V. Problems and prospects in the resource-saving and resource-reproducing geotechnology development for comprehensive mineral wealth development // Journal of Mining Science. 2012. Vol. 48, № 4. P. 688–693. http://dx.doi.org/10.1134/S1062739148040132
4. Каплунов Д. Р. Современное содержание методологии проектирования освоения недр // Недропользование – XXI век. 2008. № 1. С. 32–34.
5. Трубецкой К. Н., Корнилков С. В., Яковлев В. Л. О новых подходах к обеспечению устойчивого развития горного производства // Горный журнал. 2012. № 1. С. 15–19.
6. Kalabin G. V., Gorny V. I., Kritsuk S. G. Satellite monitoring of vegetation mantle response to the Sorsk copper-molybdenum mine impact // Journal of Mining Science. 2014. Т. 50, № 1. С. 155–162.

7. Aleksandrova T. N., Lipina L. N., Grekhnev N. I. Geoecological estimate of state of nature in a mining and processing plant influence area using geoinformation technologies // Journal of Mining Science. 2013. T. 49, № 1. C. 167–174.
8. Каплунов Д. Р., Рыльникова М. В., Радченко Д. Н. Научно-методические основы проектирования экологически сбалансированного цикла комплексного освоения и сохранения недр Земли // Условия устойчивого функционирования минерально-сырьевого комплекса России. Вып. 3: ГИАБ. 2015. Вып. 4 (спец. вып. 15). С. 5–11.
9. Cleaner Production. URL: https://web.archive.org/web/20051208113414/http://www.unido.org/en/doc/4460
10. Пирогов Г. Г. Перспективные технологии подземной добычи руд // Вестник Забайкальского государственного университета. 2017. № 2. С. 28–33.
11. Подземная обогатительная фабрика: пат. 2565300 Рос. Федерация. № 2014124330; заявл. 11.06.2014; опубл. 20.10.2015. Бюл. № 29. 7 с.
12. Соколов И. В., Гобов Н. В., Смирнов А. А., Медведев А. Н. Комплексная эколого-ориентированная подземная геотехнология добычи и обогащения железных руд // Экология и промышленность России. 2013. № 6. С. 16–20.
13. Lee C., Gillot P. Case study – a high strength paste aggregate backfill at Randgold's Loulo mine in Mali // Mine Fill 2014: proceedings of the 11th International Symposium on Mining with Backfill. Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2014. P. 231–242.
14. Packey D. J. Multiproduct mine output and the case of mining waste utilization // Resources Policy. 2012. Vol. 37, issue 1. P. 104–108. http://dx.doi.org/10.1016/j.resourpol.2011.11.002
15. Соломеин Ю. М., Никитин И. В. Определение места расположения подземного обогатительного комплекса при освоении железорудного месторождения // Проблемы недропользования. 2015. № 3(6). С. 44–48.
16. Способ разработки крутопадающих рудных месторождений с подземным обогащением: пат. 2652223 Рос. Федерация. № 2016126357; заявл. 30.06.2016; опубл. 25.04.2018, Бюл. № 12. 5 с.
17. Соколов И. В., Гобов Н. В., Антипин Ю. Г. Систематизация и методика оценки вариантов стратегии освоения железорудных месторождений с применением подземных обогатительных комплексов // ГИАБ. 2015. № 7. С. 101–109.

Статья поступила в редакцию 06 января 2019 г.

УДК [622.272.06:622.341]:519.001.57:504.06 https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-3-162-170

Environmental-friendly underground research geotechnologies of mining and processing of iron ore based on economic and mathematical modelling

Igor Vladimirovich SOKOLOV*,
Nikolay Vasilievich GOBOV**,
Yuri Mikhailovich SOLOMEIN***

Mining Institute, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Russia, Ekaterinburg

Relevance. The results of a study of an ecologically oriented integrated underground geotechnology for mining and processing iron ores are presented. It was developed as part of a geotechnological strategy, the purpose of which is to increase the economic efficiency and environmental safety of the development of iron ore deposits; the goal is to use development systems of different classes (opening and development) of the deposit and transfer the enrichment process to underground conditions.
Methodology of research. Economic and mathematical modelling of the developed versions of the geotechnological strategy and their assessment according to the proposed integrated environmental and economic criterion, taking into account the degree of closure of the mining system and the value of the net present value, were carried out.
Results of research. The parallel use of caving systems for the development of upper stages and lower stages allows us not only to increase the production capacity of the mine up to two times, but also to ensure closure of the formed mining system through the use of mining and processing waste as a filling. Transferring the enrichment process underground allows you to significantly reduce the land allotment area of the enterprise, to release only concentrate and surplus tailings to the surface, which significantly increases the environmental safety of mining and processing plants. In addition, the formation of an underground processing complex, including the stages of crushing, grinding and beneficiation of ore, near the treatment area at a safe distance, eliminates some of the processes inherent in traditional technology (transporting the rock mass to the trunk, its reloading and lifting to the surface, and the return of the beneficiation waste in the form of filling material in the mine), and therefore, to obtain an economic effect.
Conclusions. A feasibility study showed that the option of a geotechnological strategy with an underground processing complex is quite competitive, provided that its construction period does not exceed the construction period of all capital, mining and preparation workings necessary for putting the mine into operation.
Keywords: iron ore deposit, underground geotechnology, geotechnological strategy, mining system, underground mineral processing complex, net present value, economic and mathematical modeling.

This work was supported by the Comprehensive Program for Fundamental Research, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (Project 18-5-5-10).

REFERENCES

1. Trubetskoy K. N., Galchenko Yu. P. 2015, *Geoekologiya osvoyeniya nedr i ekogeotekhnologii razrabotki mestorozhdeni* [Geoecology of subsurface development and environmental geotechnology of field development]. Moscow, 360 p.
2. Trubetskoy K. N., Galchenko Yu. P. 2017, Nature-like mining technologies – the prospect of resolving global contradictions in the development of the mineral resources of the lithosphere. *Vestnik RAN* [Herald of the Russian Academy of Sciences], vol. 87, no. 7, pp. 655–662. (*In Russ.*)
3. Trubetskoy K. N., Kaplunov D. R., Ryl'nikova M. V. 2012, Problems and prospects in the resource-saving and resource-reproducing geotechnology development for comprehensive mineral wealth development. *Journal of Mining Science*, vol. 48, no. 4, pp. 688–693. http://dx.doi.org/10.1134/S1062739148040132
4. Kaplunov D. R. 2008, Updated content of the methodology of designing the development of mineral resources. *Nedropol'zovaniye – 21 vek* [Subsoil Use – XXI century], no. 1, pp. 32–34. (*In Russ.*)
5. Trubetskoy K. N., Kornilkov S. V., Yakovlev V. L. 2012, On new approaches to ensuring sustainable development of mining. *Gornyy zhurnal* [Mining Journal], no. 1, pp. 15–19. (*In Russ.*)
6. Kalabin G. V., Gorny V. I., Kritsuk S. G. 2014, Satellite monitoring of vegetation mantle response to the Sorsk copper-molybdenum mine impact. *Journal of Mining Science*, vol. 50, no. 1, pp. 155–162.
7. Aleksandrova T. N., Lipina L. N., Grekhnev N. I. 2013, Geoecological estimate of state of nature in a mining and processing plant influence area using geoinformation technologies. *Journal of Mining Science*, vol. 49, no. 1, pp. 167–174.
8. Kaplunov D. R., Ryl'nikova M. V., Radchenko D. N. 2015, Scientific and methodological foundations for designing an ecologically balanced cycle of integrated development and conservation of the Earth's bowels. Conditions for the stable functioning of the mineral resource complex of Russia. Issue 3, *Gorny Informatsionno-Analiticheskiy Byulleten (nauchno-teknicheskii zhurnal)* [Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)], issue 4 (special issue 15), pp. 5–11. (*In Russ.*)
9. Cleaner Production. URL: https://web.archive.org/web/20051208113414/http://www.unido.org/en/doc/4460
10. Pirogov G. G. 2017, Promising technologies for underground ore mining. *Vestnik Zabaykal'skogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Transbaikal State University], no. 2, pp. 28–33. (*In Russ.*)
11. 2015, *Podzemnaya obogatitel'naya fabrika* [Underground screening plant]. Patent RF no 2565300.
12. Sokolov I. V., Gobov N. V., Smirnov A. A., Medvedev A. N. 2013, Integrated ecology-oriented underground geotechnology for mining and processing of iron ores. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and industry of Russia], no. 6, pp. 16–20. (*In Russ.*)
13. Lee C., Gillot P. 2014, Case study – a high strength paste aggregate backfill at Randgold's Loulo mine in Mali. Mine Fill 2014: proceedings of the 11th International Symposium on Mining with Backfill. Perth: Australian Centre for Geomechanics, pp. 231–242.
14. Packey D. J. 2012, Multiproduct mine output and the case of mining waste utilization. *Resources Policy*, vol. 37, issue 1, pp. 104–108. http://dx.doi.org/10.1016/j.resourpol.2011.11.002
15. Solomein Yu. M., Nikitin I. V. 2015, Determination of the location of the underground processing complex during the development of the iron ore deposit. *Problemy nedropol'zovaniya* [Subsoil Use Issues], no. 3(6), pp. 44–48. (*In Russ.*)

* geotech@igduran.ru
https://orcid.org/0000-0001-7841-5319
** igeotech910@igduran.ru
https://orcid.org/0000-0002-1198-3300
*** geotech@igduran.ru
https://orcid.org/0000-0002-8226-6494

16. 2018, *Sposob razrabotki krutopadayushchikh rudnykh mestorozhdeniy s podzemnym obogashcheniyem* [Method of developing steeply dipping ore deposits with underground processing]. Patent RF no. 2652223.
17. Sokolov I. V., Gobov N. V., Antipin Yu. G. 2015, Systematization and methodology for evaluating options for the development strategy of iron ore deposits using underground processing complexes. *Gorny Informatsionno-Analiticheskiy Byulleten (nauchno-teknicheskii zhurnal*) [Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)], no. 7, pp. 101–109. (*In Russ.*)

The article was received on January 06, 2019

УДК 332.145 https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-3-171-177

Выбор направлений социально-экономического развития моногородов горной специализации

Ирина Владимировна ДРОЗДОВА*

Россия, Екатеринбург, Уральский государственный горный университет

Актуальность. Актуальность исследования обусловлена тем, что на фоне современных преобразований в политической и экономической жизни страны обостряются проблемы социальной сферы на разных пространственных уровнях. При этом города выступают в качестве территориальных центров социально-экономической трансформации в формировании новой системы отношений. В существующем многообразии выделяются поселения, где практически все противоречия между внутренними и внешними факторами, определяющими развитие города, носят особо разрушительный характер. Таким типом поселений являются моноспециализированные города, для которых характерна максимальная степень зависимости населения и его благосостояния от положения градообразующего предприятия, слабо чувствительного к структурным преобразованиям. В условиях Среднего Урала эти города в основном имеют горную специализацию. В условиях территориальной изолированности, монополизации градообразующим предприятием социально-трудовой сферы, обеспечивающей жизнедеятельность населенного пункта, формируется замкнутая структура рынка труда с ограниченными стимулами к развитию трудового и ресурсного потенциала территории, что требует нестандартных решений в области разработки социально-экономической политики.

Цель: исследование проблем сохранения и дальнейшего эффективного функционирования городов моноспециализации с учетом исторических и экономических факторов их образования; возможности оценки конкурентоспособности и потенциала таких поселений для разработки и реализации вариантов сценариев их дальнейшего социально-экономического развития.

Методы: на основе сравнительного анализа неравномерности возникновения, функционирования и развития муниципальных образований, имеющих статус моноспециализированных, рассмотрение принципов классификации, возможности интегральной оценки их конкурентоспособности и потенциала для обоснования выбора вариантов сценариев дальнейшего социально-экономического развития и поддержки.

Результаты и практическая значимость. В представленном исследовании предложена система показателей оценки уровня конкурентоспособности моногородов с целью выбора варианта сценария их социально-экономического развития для эффективной государственной поддержки.

Ключевые слова: моногорода, горная специализация, классификация, конкурентоспособность, сценарии социально-экономического развития.

Введение

Жизнеспособность России в значительной степени зависит от состояния и степени социально-экономического развития территорий особого типа – моногородов. В моногородах Среднего Урала определяющую роль в формировании градообразующего комплекса играют горные предприятия.

Градообразующий комплекс представляет собой одно или несколько предприятий одной отрасли, либо смежных отраслей, связанных единой технологической цепочкой, которые в сумме производят не менее 50 % валового продукта города, либо на которых работает не менее 25 % экономически активного населения города. Градообразующее предприятие в преобладающей мере обеспечивает условия жизнедеятельности в населенном пункте. Оно обеспечивает занятость, а следовательно, и уровень доходов значительной части населения, участвует в строительстве и содержании объектов производственной и социальной инфраструктуры, энергетики и транспорта, поддерживает программы социальной помощи. Сфера жизнеобеспечения населения является неотъемлемым звеном экономики градообразующего предприятия, что увеличивает издержки и отрицательно сказывается на конкурентоспособности выпускаемой продукции.

Глобальный финансовый кризис резко обострил социально-экономическую обстановку в моногородах, обнажив накапливавшиеся десятилетиями проблемы. В отдельных случаях масштабы этих проблем оказались столь велики, что инициировали активные социальные противоречия. В этих условиях российские моногорода остро нуждаются не просто в дополнительном увеличении адресной финансовой поддержки, а в формировании и реализации комплексной государственной политики, стимулирующей переход к устойчивому саморазвитию. В современных условиях поддержка развития моногородов продолжает оставаться одним из важных элементов государственной экономической политики.

Результаты

Выделение моногородов в качестве специфического объекта национальной государственной политики требует разработки интегрированных подходов к классификации данного типа поселений, позволяющих в дальнейшем сформулировать специфические направления и механизмы их поддержки. Важным элементом в формировании такой комплексной государственной политики является выделение групп поселений, которые можно было бы, с одной стороны, объединить общими программами поддержки и развития, а с другой, – учитывая индивидуальные особенности их текущего состояния и имеющийся потенциал, оказывать адресную, целенаправленную и более действенную помощь. Трудности создания универсальной классификации, направленной на осуществление управляющих воздействий в отношении монофункциональных поселений в масштабах всей страны, связаны со значительными различиями моногородов в достигнутом уровне социально-экономического развития, географическом положении, потенциале градообразующих предприятий.

Неоднозначность и существенные различия в уровне развития и современного состояния моногородов могут быть «проиллюстрированы» данными аналитического доклада Института комплексных стратегических исследований (ИКСИ) [1]. По результатам проведенного анализа отмечается, что действующий перечень монопрофильных муниципальных образований РФ включает 319 моногородов, где по состоянию на начало 2016 г. проживало 13 025 тыс. человек (около 9 % населения России). В зависимости от сложности социально-экономической обстановки выделяют три катего-

* drozdova.IrinaV@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0002-6634-0759

рии моногородов: города с наиболее сложным социально-экономическим положением (так называемая «красная зона» – в ней находятся 94 моногорода), города с рисками ухудшения социально-экономического положения («желтая зона» – 154 моногорода) и города со стабильной социально-экономической ситуацией («зеленая зона» – 71 моногород). Основными критериями для определения категории города являются состояние градообразующей организации (продолжает ли она производство, планирует ли высвобождение персонала), уровень безработицы в городе (по сравнению со средним по РФ), оценка населением социально-экономической ситуации в городе (на основе социологических опросов) [1].

В соответствии с приведенным «зонированием» субъекты РФ, в которых 20 % населения проживает в моногородах, распределились следующим образом (табл. 1).

Помимо Кемеровской области, к регионам с высокой долей населения, проживающего в моногородах, относятся Челябинская и Свердловская области, а также Республика Карелия – это регионы со значительным количеством монопрофильных муниципальных образований (в текущей ситуации это более 10 городов на территории субъекта РФ). В этих регионах есть достаточно выраженная специализация моногородов.

Например, значительная часть моногородов Челябинской и Свердловской областей имеет специализацию в черной или цветной металлургии, а Республики Карелия – в лесозаготовительной и целлюлозно-бумажной промышленности. Значительное число моногородов из этих регионов относится к «красной зоне» (более половины в Карелии и Челябинской области, 30 % в Свердловской области).

Несмотря на то, что в этом распределении Свердловская область занимает пятое место, по количеству моногородов она на второй позиции. В частности, в «красную зону» попали города Краснотурьинск, Волчанск, Карпинск, Североуральск, Каменск-Уральский, Первоуральск; в «желтую зону» – Красноуральск, Качканар, Верхняя Тура, Серов, Верхняя Салда; в «зеленую зону» – Полевской, Нижний Тагил, Ревда, Асбест, Верхняя Пышма, п. г. т. Малышева. В каждой из представленных групп городов присутствуют моногорода с горнодобывающей специализацией градообразующих предприятий (добыча и обогащение металлических руд и угледобыча).

Отраслевая специализация моногородов, по данным Росстата и Минэкономразвития, также неоднозначна, и демонстрирует перевес в пользу двух отраслей – металлургии и машиностроения (84 % и 59 % соответственно), (табл. 2).

Согласно расчетам ИКСИ, наибольшая часть моногородов (84 города из 319, или 26,3 %) имеет специализацию в сфере металлургии, включая добычу и обработку металлических руд, цветную и черную металлургию, производство редких металлов. Еще 59 моногородов (18,5 %) имеет машиностроительную специализацию – производство транспортных средств, оборудования и др. В целом в моногородах с металлургической и машиностроительной специализацией проживает около 60 % населения моногородов [1].

Моногорода Уральского Федерального округа являются самыми крупными в стране по численности населения (в значительной степени это обусловлено их отраслевой специализацией – металлургия, машиностроение, оборонная промышленность). Средняя численность населения уральского моногорода составляет 65,6 тыс. человек, а в 6 моногородах численность жителей превышает 100 тыс. чел. При этом на территории Уральского ФО насчитывается только 37 моногородов, однако на них приходится 20 % населения УФО [1].

На сегодняшний день целым рядом исследователей в качестве основных принципов классификации моногородов предлагаются следующие: на основе климато-географических и историко-демографических критериев (по времени возникновения, по особенности происхождения моногородов); на основе социально-экономических критериев (по стадии жизненного цикла города, по общему направлению социально-экономической динамики, по виду собственности градообразующего предприятия) [2, 3].

Кроме перечисленных принципов, отдельными авторами предлагается многокритериальный подход для использования на уровне отдельного региона Российской Федерации. Ключевыми показателями, формирующими многофакторную классификацию, предложено считать: численность населения, удаленность от крупного многофункционального поселения, объем отгрузки (или промышленного производства) на душу населения, объем расходов бюджета органа местного самоуправления муниципального образования на душу населения, размер заработной платы, количество градообразующих предприятий и их хозяйственная специализация, финансовые результаты крупных и средних организаций на душу населения. Согласно данным принципам классификации, все моногорода Свердловской области могут быть подразделены на пять групп (табл. 3). [2, 4, 5]

Таблица 1. Субъекты РФ, в которых 20 % населения проживает в моногородах.
Table 1. Subjects of the Russian Federation in which 20% of the population lives in single-industry towns.

Регион	Население моногородов, тыс. чел.	Доля населения в моногородах, %	Количество моногородов		
			«Красная зона»	«Желтая зона»	«Зеленая зона»
Кемеровская область	1636	60,2	8	12	4
Челябинская область	1130	32,3	7	5	4
Вологодская область	365	30,7	3	1	0
Республика Хакасия	157	29,2	1	5	0
Свердловская область	1253	28,9	6	5	6
Республика Татарстан	1034	26,7	2	4	1
Архангельская область	298	25,3	2	3	2
Самарская область	786	24,5	0	1	1
Республика Карелия	143	22,7	6	5	0
Амурская область	173	21,4	2	2	0

Таблица 2. Распределение моногородов по отраслям специализации.
Table 2. Distribution of single-industry towns by industry.

Отрасль	Количество моногородов	Процент к итогу	Население моногородов, тыс. чел.	Процент к итогу
Металлургия	**84**	**26,3**	**3948**	**30,3**
черная	36	11,3	2649	20,3
цветная	24	7,5	903	6,9
Добыча металлических руд	13	4,1	266	2,0
Производство редких металлов	11	3,4	130	1,0
Машиностроение	**59**	**18,5**	**3812**	**29,3**
Деревообработка	38	11,9	644	4,9
Производство неметаллической продукции	37	11,6	683	5,2
Угольная промышленность	30	9,4	1344	10,3
Химическая промышленность	23	7,2	1162	8,9
Пищевая промышленность	17	5,3	214	1,6
Текстильная промышленность	12	3,8	193	1,5
Оборонная промышленность	8	2,5	473	3,6
Атомная промышленность	7	2,2	415	3,2
Транспорт	4	1,3	136	1,0
Всего	**319**	**100,0**	**13 025**	**100,0**

Таблица 3. Пример классификации моногородов Свердловской области.
Table 3. An example of the classification of single-industry towns in the Sverdlovsk region.

Классификация	Численность населения, чел.	Удаленность от Екатеринбурга, км	Объем отгрузки на душу населения, тыс. руб.	Размер заработной платы, тыс. руб.	Градообразующее предприятие	Финансовые результаты крупных и средних организаций	Города, вошедшие в группу
1-я группа (крупные поселения с высоким потенциалом диверсификации экономики и дальнейшего развития как многофункционального центра)	Больше 100	Более 100	От 150	От 18 до 20	Несколько	От 1 млрд. руб.	Нижний Тагил, Каменск-Уральский, Серов
2-я группа (города, значительно вовлеченные в хозяйственные связи с Екатеринбургом)	От 70 до 100	До 100	От 70 до 100	От 16 до 18	Одно-два (успешны)	От 600 млн руб. до 1 млрд. руб.	Полевской, Асбест, Первоуральск, Верхняя Пышма
3-я группа (города, удаленные от Екатеринбурга, с промышленным потенциалом и перспективной хозяйственной специализацией)	От 50 до 70	Более 200	Свыше 200	От 20 до 24	Одно (успешно)	От 1 млрд. руб.	Верхняя Салда, Качканар, Краснотурьинск, п. г. т. Малышева, Ревда
4-я группа (города, находящиеся на значительном удалении от Екатеринбурга, хронически депрессивные, угасающие, со сравнительно большой численностью населения)	От 25 до 50	Более 200	От 10 до 70	От 13 до 16	Одно (угасает)	До 800 млн руб.	Волчанск, Верхняя Тура, Красноуральск
5-я группа (города хронически депрессивные, исчерпавшие свою первоначальную специализацию, со сравнительно небольшой численностью населения, удаленные от крупных городов)	До 25	Более 200	Ниже 10	Ниже 13	Одно (угасает)	Отрицательный	Североуральск, Карпинск

Таблица 4. Показатели оценки уровня конкурентоспособности моногородов горной специализации.
Table 4. Indicators for assessing the competitiveness of single-industry towns of mining area of speciality.

№ п/п	Сфера оценки показателей конкурентоспособности	Показатели	Значимость соответствующей группы показателей для классификации моногородов по уровню конкурентоспособности
1	Экономическо-географическая	1.1. Климат 1.2. Территория, км^2 1.3. Географическая удаленность от обл. центра 1.4. Обеспеченность транспортной инфраструктурой (автодорогами, ж/д сообщением с оценкой интенсивности движения, кол-вом пар поездов в сут.) 1.5. Показатели экологической оценки территории города (система показателей)	Определяет степень благоприятности (неблагоприятности) природно-климатических условий, экологической обстановки для дальнейшего промышленного освоения и развития территории; а также и для развития сферы туризма, актуальной для территорий с соответствующими благоприятными природно-климатическими условиями
2	Демографическая	2.1. Общая численность населения, тыс. чел. 2.2. Число жителей на 1 км^2 2.3. Плотность населения на прилегающих территориях, чел./км^2 2.4. Место, занимаемое городом в области по численности 2.5. Коэффициент рождаемости 2.6. Коэффициент смертности 2.7. Коэффициент миграционного прироста 2.8. Коэффициент естественного прироста	Определяет степень благоприятности (неблагоприятности) условий для освоения территории с точки зрения ее привлекательности для постоянного проживания населения, а также возможности (невозможности) организации и регулирования миграционных процессов в случае привлечения трудовых ресурсов
3	Производственно-экономическая	3.1. Среднедушевой объем промышленного производства, тыс. руб./ чел. 3.2. Динамика среднедушевого объема промышленного производства, % 3.3. Среднедушевой оборот розничной торговли, тыс. руб./чел. 3.4. Отраслевая структура экономики города, % 3.5. Доля прибыльных предприятий, %	Определяет возможность (невозможность), а также целесообразность (нецелесообразность) реструктуризации экономики города в пользу непрофильных отраслей или отраслей, с перспективой увеличения удельного веса в структуре экономики города
4	Финансовая	4.1.Среднедушевой объем инвестиций в основной капитал, тыс. руб./чел. 4.2. Динамика среднедушевого объема инвестиций, % 4.3. Среднедушевая доходность местного бюджета, тыс. руб./чел. 4.4. Дефицит (профицит) бюджета, тыс. руб. 4.5. Структура источников финансирования (инвестирования), участвующих в программах развития города, %	Оценивает степень инвестиционной привлекательности (непривлекательности) города (градообразующего предприятия), а также возможности привлечения альтернативных источников финансирования программ развития и поддержки в зависимости от степени депрессивности состояния города и требуемых направлений и объемов вложений
5	Трудовые ресурсы и рынок труда	5.1. Численность экономически активного населения, чел. 5.2. Уровень регистрируемой безработицы и ее динамика, % 5.3. Структура безработных городского (локального) рынка труда, % 5.4. Средняя продолжительность безработицы, мес	Оценивает уровень состояния (конъюнктуру) локального рынка труда с целью вовлечения имеющихся резервов (предложения трудовых ресурсов) в новые перспективные виды деятельности в случае диверсификации градообразующего предприятия или развития новых отраслей в экономике города
6.	Социальная	6.1. Доля прожиточного минимума в средней заработной плате, % 6.2. Площадь жилых помещений на одного жителя, м^2 6.3. Число объектов культуры 6.4. Число учреждений здравоохранения и образования	Оценивает возможности (ограничения) социальной сферы города с точки зрения необходимости ее поддержания и развития, а следовательно, дополнительного финансирования с целью создания условий для повышения уровня жизни населения, его качества (обеспеченности объектами здравоохранения, образования, культуры, спорта), а также обеспечения безопасности, комфортности городской среды
7.	Моноспециализация	7.1. Стадия развития и современное состояние градообразующего предприятия (с учетом ресурсного обеспечения) 7.2. Отраслевая принадлежность градообразующего предприятия, рейтинг в отрасли, конкурентные преимущества, основные ТЭП 7.3. Доля объема промышленного производства градообразующего предприятия в показателях города, % 7.4. Доля градообразующего предприятия в численности занятых в экономике города, % 7.5. Доля градообразующего предприятия в численности занятых в промышленности города, % 7.6. Объем и структура средств градообразующего предприятия, направленных в социальную сферу, в составе текущих и капитальных затрат, тыс. руб.	Оценивает степень депрессивности города; на основе стадии развития градообразующего предприятия (затухание, стабильность, рост) и степени его присутствия в показателях города определяет возможности (невозможности) использования потенциала градообразующего предприятия в реализации программ социально-экономической поддержки города

[1] Из доклада В. А. Галкина на 13-й ежегодной конференции «Промышленная безопасность, экология, охрана и медицина труда в СУЭК. Итоги 2016 года. Задачи 2017 года».

Таблица 5. Выбор варианта сценария развития моногорода по уровню интегрального показателя конкурентоспособности.
Table 5. Selection of a scenario option for the development of a single-industry town by the level of the integral indicator of competitiveness.

Группа моногородов по интегральному показателю конкурентоспособности	Варианты сценариев дальнейшего развития моногородов			
	Сохранение моноспециализации	Диверсификация экономики города	Эколого-туристическое рекреационное зонирование территории	Постепенное расселение моногорода
С низким уровнем			+	+
С уровнем ниже среднего	+	+		
С уровнем выше среднего		+	+	
С высоким уровнем	+	+	+	

Таким образом, были выделены 5 основных групп моногородов, расположенных в Свердловской области, которые характеризуются рядом признаков, в соответствии с которыми могут быть разработаны направления мер социально-экономического развития и поддержки этих поселений. В приведенной классификации учитывается ограниченный спектр показателей. В связи с этим представляется необходимым обосновать систему показателей, оценивающих конкурентоспособность муниципальных образований с учетом их отраслевой специализации (а именно горной) с целью разработки и обоснования выбора сценариев социально-экономического развития с их последующей реализацией (табл. 4) [6, 7].

Предложенный перечень показателей должен быть включен в интегральную оценку конкурентоспособности конкретного моногорода на основе расчета индексов конкурентоспособности каждой из семи указанных сфер:

$$I_к = (I_{эг} + I_д + I_{пэ} + I_ф + I_{тр} + I_с + I_м)/7,$$

где $I_к$ – интегральный индекс конкурентоспособности; $I_{эг}$ – индекс экономико-географической конкурентоспособности (потенциала); $I_д$ – индекс демографической конкурентоспособности (потенциала); $I_{пэ}$ – индекс производственно-экономической конкурентоспособности (потенциала); $I_ф$ – индекс финансовой конкурентоспособности (потенциала); $I_{тр}$ – индекс трудовой конкурентоспособности (потенциала); $I_с$ – индекс социальной конкурентоспособности (потенциала); $I_м$ – индекс конкурентоспособности по показателям моноспециализации (потенциала) [4, 8, 9, 10, 11].

Предложенный перечень показателей не является окончательным и может быть дополнен и оценен по специфическим критериям, исходя из особенностей территорий, отраслевой принадлежности градообразующего предприятия. Индексы конкурентоспособности каждой сферы определяются в ходе статистической обработки данных по всем включенным в оценку показателям, в частности, по методике «Эксперт РА». По интегральному индексу конкурентоспособности может быть произведена классификация моногородов. Данный уровень будет считаться низким, если пределы его изменения от 0 до 0,25; ниже среднего – от 0,26 до 0,5; выше среднего – от 0,5 до 0,75; высокий – от 0,75 до 1. Согласно этому, в соответствии с достигнутым интегральным уровнем конкурентоспособности и индивидуальными особенностями моногородов могут быть выбраны сценарии дальнейшего развития моногородов, представленные в табл. 5 [4, 5, 12–15].

Заключение

Предлагается в соответствии с классификацией моногородов по интегральному индексу конкурентоспособности обосновать выбор и дальнейшую реализацию четырех вариантов сценариев социально-экономического развития моногородов. Так, первый вариант предполагает определение объема и структуры инвестиций на модернизацию базовой отрасли специализации градообразующего предприятия и усиление его рыночных позиций с сохранением монопрофильности экономики города. Второй вариант также требует значительных инвестиционных вложений, направленных на реструктуризацию экономики города, на развитие новых отраслей и видов деятельности, постепенно замещающих профильную сферу. Третий сценарий делает акцент на имеющийся природно-климатический, экологический потенциал городской и прилегающей территорий и предполагает использование его инвестиционной привлекательности для развития туристической отрасли. Четвертый сценарий касается, в первую очередь, городов с низким уровнем конкурентоспособности, т. е. городов, потенциал которых отсутствует по всем оцениваемым показателям, все его ресурсы, включая природные, исчерпаны полностью, маятниковая миграция населения нецелесообразна. В связи с этим такой сценарий требует привлечения инвестиций для финансирования программ по расселению моногородов, по созданию новых рабочих мест на других территориях.

Окончательный выбор варианта сценария социально-экономического развития моногорода для его дальнейшей реализации требует учета индивидуальных особенностей поселений для более эффективной адресной поддержки и решения локальных проблем с привлечением соответствующих источников финансирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Обзор российских моногородов: аналитический доклад Института комплексных стратегических исследований (ИКСИ). URL: https://icss.ru/images/pdf/research_pdf/MONOTOWNS.pdf
2. Устинов А. Ю. Соотнесение различных групп моногородов Свердловской области и важнейших направлений их поддержки // Государство, политика, социум: вызовы и стратегические приоритеты развития: Междунар. конф. (Екатеринбург, 24–25 нояб. 2011 г.): сб. статей. Екатеринбург: УрАГС, 2011. Т. 2. 252 с.
3. Анимица Е. Г. Концептуальные подходы к разработке стратегии развития монопрофильного города. Екатеринбург: Изд-во УрГЭУ, 2010. 81 с.
4. Манаева И. В., Растворцева С. Н. Методический инструментарий оценки конкурентоспособности моногорода // Региональная экономика: теория и практика. 2016. № 5(428). С. 23–39.
5. Глебова И. С., Роднянский Д. В. Анализ оценки инвестиционного потенциала субъектов Приволжского федерального округа Российской Федерации // Фундаментальные исследования. 2014. № 11. С. 2016–2020.

6. Растворцева С. Н., Манаева И. В. К вопросу о разработке типологии моногородов РФ // Актуальные проблемы развития национальной и региональной экономик: сборник научных трудов V Междунар. науч.-практ. конф. (Белгород, 24 апр. 2014 г.). Белгород: ООО «Эпицентр», 2014. С. 90–94.
7. Симонова Л. М., Трусова К. Е. Специфика социально-экономического развития моногородов в системе регионального управления // Вестник ТюмГУ. 2012. № 8. С. 201–208.
8. Крюков В. А., Севастьянова А. Е., Токарев А. Н., Шмат В. В. Современный подход к разработке и выбору стратегических альтернатив развития ресурсных регионов // Экономика региона. 2017. №1. С. 93-106. https://doi.org/10.17059/2017-1-9
9. Сухарев О. С. Региональная экономическая политика: структурный подход и инструменты (теоретическая постановка) // Экономика региона. 2015. № 2. С. 9–23. https://doi.org/10.17059/2015-2-1
10. Баландин Д. А., Ионова И. Г., Пыткин А. Н. Особенности эффективного управления монопромышленными территориями в условиях инновационного развития экономики региона // Научное обозрение. 2016. № 16. С. 114–118.
11. Кислицына В. В., Чеглакова Л. С., Караулов В. М., Чикишева А. Н. Формирование комплексного подхода к оценке социально-экономического развития регионов // Экономика региона. 2017. № 2. С. 369–381. https://doi.org/10.17059/2017-2-4
12. Ласунов А. Н., Главацкий В. Б. Механизм трансформации промышленных моногородов в конкурентной среде // Научное обозрение. 2015. № 6. С. 275–278.
13. Ионова И. Г., Звягина О. В. Управление развитием градообразующих предприятий старопромышленных территорий региона // Научное мнение. 2014. № 4. С. 192–195.
14. Комелина О. В., Ржепишевская В. В. Конкурентный потенциал в системе регионального управления // Экономика региона. 2014. № 1. С. 93–102.
15. Иванова О. П. Взаимовлияние производственной специализации региона и внутрирегиональных кластеров // Экономика региона. 2018. Т. 14, вып. 4. С. 1207–1220. https://doi.org/10.17059/2018-4-12

Статья поступила в редакцию 28 августа 2019 г.

УДК 332.145 https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-3-168-174

The choice of socio-economic development areas for one-factory towns

Irina Vladimirovna DROZDOVA*

Russia, Ekaterinburg, Ural State Mining University

Relevance. The relevance of the study is due to the fact that against the background of modern transformations in the political and economic life of the country, the problems of the social sphere at different spatial levels are aggravated. At the same time, cities act as territorial centers of socio-economic transformation in the formation of a new system of relations. In the existing diversity, settlements stand out, where almost all the contradictions between the internal and external factors that determine the development of the city are especially destructive. This type of settlement is a monotown, which is characterized by the maximum degree of dependence of the population and its welfare on the position of the city-forming enterprise, weakly sensitive to structural transformations. In the conditions of the Middle Urals, these cities mainly have mining area of specialty. In conditions of territorial isolation, monopolization by the city-forming enterprise of the social and labor sphere, which ensures the vital activity of the settlement, a closed labor market structure is formed with limited incentives for the development of labor and resource potential of the territory, which requires non-standard decisions in the field of developing socio-economic policies.

Purpose: the study of the problems of preservation and further effective functioning of monotowns, taking into account the historical and economic factors of their formation; the ability to assess the competitiveness and potential of such settlements for the development and implementation of scenarios for their further socio-economic development.

Methods: based on a comparative analysis of the uneven appearance, functioning and development of one-factory towns, consideration of the principles of classification, the possibility of an integrated assessment of their competitiveness and potential to justify the choice of scenarios for further socio-economic development and support.

Results and practical significance. The presented study proposes a system of indicators for assessing the competitiveness of one-factory towns with the aim of choosing a scenario for their socio-economic development for effective state support.

Keywords: one-factory town, mining area of specialty, classification, competitiveness, scenarios of socio-economic development.

REFERENCES

1. Review of Russian single-industry towns: analytical report by the Institute for Integrated Strategic Studies. URL: https://icss.ru/images/pdf/research_pdf/MONOTOWNS.pdf
2. Ustinov A. Yu. 2011, Correlation of various groups of single-industry towns of the Sverdlovsk region and the most important areas of their support. State, Politics, Society: Challenges and Strategic Development Priorities: International Conference. (Ekaterinburg, 24–25 November. 2011): collection of articles, vol. 2, 252 p.
3. Animitsa Ye. G. 2010, *Kontseptual'nyye podkhody k razrabotke strategii razvitiya monoprofil'nogo goroda* [Conceptual approaches to developing a strategy for a single-industry city]. Ekaterinburg, 81 p.
4. Manaeva I.V., Rastvortseva S.N. 2016, Methodological tools for assessing the competitiveness of a single-industry town. *Regional'naya ekonomika: teoriya i praktika* [Regional Economics: Theory and Practice], no. 5(428), pp. 23–39. (*In Russ.*)
5. Glebova I. S., Rodnyansky D. V. 2014, Analysis of the assessment of investment potential of constituent entities of the Volga Federal District of the Russian Federation. *Fundamental'nyye issledovaniya* [Fundamental research], no. 11, pp. 2016–2020. (*In Russ.*)
6. Rastvortseva S. N., Manaeva I. V. 2014, To the question of developing a typology of single-industry towns of the Russian Federation. Actual problems of development of national and regional economies: a collection of scientific papers of the V International scientific-practical conference (Belgorod, April 24, 2014), pp. 90–94.
7. Simonova L. M., Trusova K. E. 2012, Specificity of the socio-economic development of single-industry towns in the regional management system. *Vestnik TyumGU* [Tymen state university herald], no. 8, pp. 201–208. (*In Russ.*)
8. Kryukov V. A., Sevastyanova A. E., Tokarev A. N., Shmat V. V. 2017, The modern approach to the development and selection of strategic alternatives for the development of resource regions. *Ekonomika regiona* [The economy of the region], no. 1, pp. 93–106. (*In Russ.*) https://doi.org/10.17059/2017-1-9
9. Sukharev O. S. 2015, Regional economic policy: structural approach and tools (theoretical setting). *Ekonomika regiona* [The economy of the region], no. 2, pp. 9–23. (*In Russ.*) https://doi.org/10.17059/2015-2-1
10. Balandin D. A., Ionova I. G., Pytkin A. N. 2016, Features of the effective management of mono-industrial territories in the conditions of innovative development of the regional economy. *Nauchnoye obozreniye* [Science Review], no. 16, pp. 114–118. (*In Russ.*)
11. Kislitsyna V. V., Cheglakova L. S., Karaulov V. M., Chikisheva A. N. 2017, Formation of an integrated approach to assessing the socio-economic development of regions. *Ekonomika regiona* [The economy of the region], no. 2, pp. 369–381. (*In Russ.*) https://doi.org/10.17059/2017-2-4
12. Lasunov A. N., Glavatsky V. B. 2015, The mechanism of transformation of industrial single-industry towns in a competitive environment. *Nauchnoye obozreniye* [Science Review], no. 6, pp. 275–278. (*In Russ.*)
13. Ionova I. G., Zvyagina O. V. 2014, Management of the development of city-forming enterprises of old industrial territories of the region. *Nauchnoye mneniye* [Scientific opinion], no. 4, pp. 192–195. (*In Russ.*)
14. Komelina O. V., Rzhepishevskaya V. V. 2014, Competitive potential in the regional management system. *Ekonomika regiona* [The economy of the region], no. 1, pp. 93–102. (*In Russ.*)
15. Ivanova O. P. 2018, Interaction of production specialization of a region and intraregional clusters. *Ekonomika regiona* [The economy of the region], vol. 14, issue 4, pp. 1207–1220. (*In Russ.*) https://doi.org/10.17059/2018-4-12

The article was received on August 28, 2019

* ✉ drozdova.IrinaV@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0002-6634-0759

История горного дела

Дмитрий Сергеевич Штейнберг (1910–1992) и дмиштейнбергит[1]

Александр Георгиевич ШОРИН[1]*,
Юрий Викторович ЕРОХИН[2]**
*sandy_blood@mail.ru
https://orcid.org/0000-0003-3288-4958
**erokhin-yu@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0002-0577-5898

[1]Уральский государственный горный университет
[2]Институт геологии и геохимии им. акад. А. Н. Заварицкого УрО РАН

Aleksandr Georgievich SHORIN[1]*,
Yuriy Viktorovich EROKHIN[2]**
*sandy_blood@mail.ru
https://orcid.org/0000-0003-3288-4958
**erokhin-yu@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0002-0577-5898

[1]Ural State Mining University
[2]Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of RAS

The article sets out the biography of D.S. Steinberg, the history of the discovery of dminsteinbergite and its distinguishing features. Dmitry Sergeyevich Steinberg was a major scientist in the field of petrology, and for a long time was the head of two petrography laboratories (at the Mining Institute and at the Institute of Geology and Geochemistry of the UFAN USSR).

Keywords: mineral, feldspar, dmisteinbergite, petrograph, D. S. Steinberg.

В статье изложена биография Д. С. Штейнберга, история открытия дмиштейнбергита и его отличительные признаки. Дмитрий Сергеевич Штейнберг являлся крупным ученым в области петрологии, и долгое время был заведующим двух лабораторий петрографии (в Горном институте и в Институте геологии и геохимии УФАН СССР).

Ключевые слова: минерал, полевой шпат, дмиштейнбергит, петрограф, Д. С. Штейнберг.

О Дмитрии Сергеевиче написано много заметок и воспоминаний [1–9 и др.], к сожалению, слишком заостренных на его научных достижениях, поэтому мы постараемся дать нормальную биографию ученого.

Д. С. Штейнберг родился 23 февраля (8 марта по новому стилю) 1910 г. в заводском пригороде г. Перми (пос. Мотовилиха) в семье уральского инженера-металлурга, будущего чл.-корр. АН СССР Сергея Самойловича Штейнберга (1872–1940), который работал на местном пушечном заводе. В 1917 г. Дмитрий Сергеевич должен был пойти в школу, но из-за назревающих бурных перемен в государстве начал обучение на дому у отца и матери. В 1920 г. семья перебирается в г. Златоуст, где на заводе «Южуралтреста» С. С. Штейнберг становится главным электрометаллургом, сконструировав электропечь «Штейнберга–Грамолина». Здесь Дмитрий Сергеевич пошел в школу и в 1925 г. ее окончил. Тогда же в 1925 г. вся семья перебирается в г. Свердловск, где С. С. Штейнберг становится заведующим кафедрой металловедения в Уральском политехническом институте. Дмитрий Сергеевич, соответственно, в том же 1925 г., т. е. в возрасте 15 лет, поступает на горный факультет УПИ. Хотя в школьной характеристике Д. С. Штейнберга и отмечались «выдающиеся способности» к математике и физике, но Горный факультет был рядом с домом его родителей, а далеко ходить подростку, привыкшему к домашней жизни, было страшновато.

В 1929 г. Дмитрий Сергеевич окончил обучение на геологоразведочном отделении горного факультета Ураль-

Фото 1. Дмитрий Сергеевич Штейнберг (1910–1992 гг.). Приблизительно 1970-е гг., когда он был заведующим лабораторией [1].

[1]Продолжение серии статей проекта «Минералогия в лицах». См.: А. В. Шубников (1887–1970) и шубниковит (Изв. УГГУ, № 1(49), 2018. С. 140–146); В. П. Шуйский (1935–2000) и шуйскит (Изв. УГГУ, № 2(50), 2018. С. 157–161); Ю. С. Кобяшев (1935–2009) и кобяшевит (Изв. УГГУ, № 3(51), 2018. С. 165–175); Анатолий Филиппович Бушмакин (1947–1999) и бушмакинит (Изв. УГГУ, № 4(52), 2018. С. 152–157); Святослав Несторович Иванов (1911–2003) и святославит (Изв. УГГУ, № 1(53), 2019. С. 171–177), Владимир Николаевич Авдонин (1925-2017) и авдонинит (Изв.УГГУ,№ 2(54), 2019, С. 166-172)

Основные даты жизни и деятельности Д. С. Штейнберга [1–9 и др.].

1910 – родился 23 февраля (8 марта по новому стилю) в пригороде Перми

1925 – окончил школу в Златоусте и поступил на геологоразведочное отделение горного факультета УПИ в Свердловске

1929 – после института работал на производстве в Джетыгаре

1933 – срочная служба в армии

1933 – родился первый сын Александр, будущий геолог

1934 – после срочной службы в РККА работал в музее, затем геологом в «Уралзолоте»

1936 – ассистент на кафедре петрографии в Свердловский горный институт

1939 – присвоена ученая степень кандидата геол.-минерал. наук

1940 – доцент кафедры петрографии в СГИ

1941 – родился второй сын – Дмитрий, будущий геолог и философ

1941–1945 – в годы Великой Отечественной войны вновь призван на службу, преподавал картографию в пехотном училище

1945 – заведующий кафедрой петрографии, награжден медалью «За победу над Германией в Великой отечественной войне 1941–1945 гг.»

1945–1949 – декан геологоразведочного факультета СГИ

1957 – ИГГ УФАН СССР, заведующий лабораторией петрографии

1964 – стал профессором

1965 – присвоена ученая степень доктора геол.-минерал. наук

1970 – награжден медалью «За доблестный труд в ознаменование 100-летия со дня рождения Владимира Ильича Ленина».

1988 – главный научный сотрудник

1991 – заслуженный деятель науки РФ

1992 – 10 августа умер в Екатеринбурге.

Фото 2. Дмитрий Сергеевич Штейнберг в Евстюнинском карьере, 1958 г. Справа крайний Г. Ф. Червяковский, в центре Л. В. Малахова. Фото из архива Д. Д. Штейнберга.

уже в 1936 г. его приняли на работу ассистентом на кафедру петрографии. В 1939 г. в «Трудах Свердловского горного института» Дмитрий Сергеевич опубликовал свою статью «О классификации гранитов». Ученый совет СГИ за эту работу присвоил ему ученую степень кандидата геолого-минералогических наук. В 1940 г. после утверждения ученой степени ВАКом он был назначен доцентом кафедры петрографии и минералогии. По существовавшему в те годы «Положению о научных работниках» Дмитрию Сергеевичу дали трехкомнатную квартиру в только что построенном 1-м профессорском корпусе академического Втузгородка, и жизнь, казалось бы, наладилась, но началась война.

В январе 1941 г. у Дмитрия Сергеевича родился второй сын – Дмитрий, также будущий геолог, писатель и по совместительству философ. Когда началась Великая Отечественная война, Дмитрия Сергеевича призвали в армию. С октября 1941 г. по октябрь 1945 г. он преподавал топографию в офицерском пехотном училище, расположенном в г. Свердловске. Даже в эти трудные времена Дмитрий Сергеевич не бросил заниматься наукой и в 1944 г. опубликовал работу по петрохимии гранитов Урала. По ского политехнического института, и в том же году он был послан на работу в поселок (с 1939 г. – город) Джетыгара (ныне территория Казахстана). Там на поисках золота он за один год «сделал карьеру» от коллектора до начальника геолого-поисковой партии. В Джетыгаре Дмитрий Сергеевич проработал до конца 1933 г., когда его призвали в Рабоче-крестьянскую Красную армию. При этом в январе 1933 г. у него родился первый сын Александр Дмитриевич (1933–2005), будущий инженер-геолог и Почетный разведчик недр (1994). Осенью 1934 г. Дмитрия Сергеевича демобилизовали из РККА, и он вернулся в г. Свердловск. Сначала он попытался устроиться на работу в недавно выделенный из громоздкой структуры УрГУ Свердловский горный институт. Но его взяли лишь внештатным сотрудником в Уральский геологический музей, и через полгода он снова был вынужден трудиться геологом на поисках золота в тресте «Уралзолото».

Работая на золотоносных россыпях и связанных с ними гранитах, Дмитрий Сергеевич постепенно становился известным специалистом по петрографии гранитов, и

Фото 3. Дмитрий Сергеевич Штейнберг (третий слева) и Алексей Александрович Маракушев (второй слева) с коллегами на Денежкином камне, 1976 г. Фото из архива Д.Д. Штейнберга.

Фото 4. Декан Дмитрий Сергеевич Штейнберг (пятый слева во втором ряду) среди преподавателей своего факультета, 1946 г. Фото из архива В.В. Григорьева.

Персоналии: 1-й ряд (слева направо) - Павел Иванович Кутюхин, зав. кафедры "Геология и разведка рудных месторождений"; Константин Константинович Матвеев, зав. кафедры "Минералогия"; В.Н. Головцын, доцент кафедры "Геофизические методы разведки"; Анисим Ефремович Малахов, зав. кафедры "Геология месторождений полезных ископаемых"; Модест Онисимович Клер, зав. кафедры "Гидрогеология и инженерная геология"; Ольга Федоровна Нейман, зав. кафедры "Палеонтология". 2-й ряд (слева направо) - Анатолий Иванович Александров, специалист по демантоидам; В.И. Матвеев, ассистент кафедры "Минералогия"; Евгения Ивановна Тараканова, геолог-угольщик; Е.М. Клер, дочь М.О. Клера, минералог; Дмитрий Сергеевич Штейнберг, декан, зав. кафедры "Петрография"; Аркадий Константинович Подногин, доцент кафедры "Петрография"; трое неизвестных; Николай Александрович Иванов, зав. кафедры "Геофизические методы разведки".

воспоминаниям домочадцев, он допоздна засиживался в училище, где и работал в тишине, так как дома таких условий не было, из трех комнат две были заняты эвакуированными ленинградцами.

После демобилизации из армии в 1945 г. Дмитрий Сергеевич вернулся на работу в СГИ и стал деканом геологоразведочного факультета (1945–1949). В том же 1945 г. кафедру минералогии и петрографии разделили на две, и Дмитрий Сергеевич стал исполняющим обязанности заведующего кафедрой петрографии (вполне вероятно, что процесс разделения был инициирован самим деканом). В качестве и. о. зав. кафедрой он проработал десять лет (до 1955 г.), после чего кафедры минералогии и петрографии снова объединили, и Дмитрий Сергеевич понял, что с преподавательской работы надо уходить. Когда намерения Дмитрия Сергеевича стали известны руководству института, то кафедры снова разделили, и в 1957 г. его снова назначили и. о. зав. кафедрой. Быть постоянным и. о. зав. кафедрой Дмитрию Сергеевичу, видимо, слегка надоело и в 1957 г. он перешел на работу в Горно-геологический институт УФАН СССР, где занял должность зав. лабораторией петрографии, уже без приставки «и. о.». Хотя вполне вероятно, что Дмитрию Сергеевичу пришлось уйти из Горного института после одного неприятного инцидента, описанного А. П. Сиговым и приведенного в книге профессора В. В. Филатова [10, стр. 265]: «Разбиралось «дело» Сергея Андреевича Вахромеева, обвинявшегося в «преклонении перед иностранщиной». При перечислении докладчиком-обвинителем проступков ответчика Дмитрий Сергеевич негромко произнес: «Чепуха!». На его беду в это время наступила тишина, и его реплика была услышана. Ну, о последствиях можно не говорить…».

В целом Дмитрий Сергеевич за период работы в Свердловском горном институте активно занимался научной и производственной работой, совмещая этот процесс с обучением студентов. В 1936 г. по заданию производства он приступает к изучению петрологии гранитоидов Урала в связи с их металлогенией, в первую очередь золота. В классической сводке по золоторудным месторождениям Урала П. И. Кутюхин отмечает работу по оценке этого месторождения им и Д. С. Штейнбергом в 1941–1942 гг. В этой же сводке есть статья Дмитрия Сергеевича «Месторождения Благодатные». В этой же сводке есть ссылки на

Фото 5. Два "ДС"а. Дмитрий Сергеевич Коржинский и Дмитрий Сергеевич Штейнберг. Магнитогорск, 1957 г. Фото из архива Д.Д. Штейнберга.

Который не стрелял

Никто поделать ничего не смог.
Нет, смог один, который не стрелял.
В. Высоцкий

Общеинститутское собрание, посвященное борьбе с космополитизмом, было назначено на 7 вечера понедельника, 17 октября 1949 года. Присутствие на нем было «добровольно-принудительным» – заведующие кафедрами и ведущие преподаватели в обязательном порядке, остальные – планово, «по разнарядке».

Геологи Сигов и Вахромеев шли туда неохотно, и дело даже не в том, что понимали: очередная «болтология» затянется допоздна и домой по осенней слякоти придется возвращаться уже в полной темноте, а потому что оба не любили идеологические мероприятия. Они были «полевиками», увлеченными своей работой, и если преподавательскую деятельность еще могли рассматривать как необходимую в плане воспитания нового поколения, то любые партийно-идеологические собрания переваривали с трудом. Однако присутствие обоих было необходимым, ибо чем выше становились их профессиональные достижения, тем больше было обязательств соблюдать установленные правила, как писаные, так и неписаные. Достижений между тем у обоих в последнее время хватало: 45-летний Анатолий Павлович Сигов, в прошлом году защитивший кандидатскую диссертацию, в нынешнем уже успел за успешное картирование месторождений получить медаль «За трудовую доблесть», а Сергей Андреевич Вахромеев в свои 50 уже был профессором и недавно стал заведующим кафедрой геологии рудных месторождений.

– Лучше б я остался поработать на кафедре, поперек горло все это, – ворчал Вахромеев. – А для таких дел у нас есть Штейнберг. Он декан, пусть и отдувается.

Оба они покосились на Дмитрия Сергеевича Штейнберга, который как раз проходил мимо, направляясь на то же собрание что и они, но шел один, без компании, погруженный в какие-то думы.

Сергеевич Штейнберг был из тех, кого любили не особо.

– Могу по пунктам, как нас учили когда-то, – усмехнулся Вахромеев. – Во-первых, видел его еще студентом: он был домашним мальчиком. Этакий юный вундеркинд, заучка, таких никто не любит. Во-вторых: а самого его сейчас со студентами ты видел? Лекцию отчитал и ушел, даже не пытаясь скрыть того, что с ними ему неинтересно. В-третьих, папа у него был кто? Правильно, член-корреспондент Академии наук. Не поэтому ли его назначили деканом геологоразведочного факультета в 35 лет? Вот раз назначили – пусть и отдувается.

– Перебарщиваешь, – поморщился Сигов. – Во-первых, быть умным со студенческой скамьи

Фото 6. Дмитрий Сергеевич Штейнберг за работой, 1971 г. Фото из архива Д.Д. Штейнберга.

его отчеты по геологической съемке в районе Невьянска в 1936 г. и Благодатных рудников в 1938 г. В последние годы работы в Горном институте он вел активные тематические работы на Кусинско-Копанской расслоенной интрузии, а затем на магнетитовых месторождениях Кушвинского района. Здесь у него работали ставшие потом известными А. А. Маракушев и А. С. Варлаков, а также доцент кафедры Л. И. Кравцова.

Расцвет научной деятельности Дмитрия Сергеевича приходится на время, когда он перешел в 1957 г. в Горно-геологический институт УФАН СССР. В качестве зав. лабораторией он смог создать вокруг себя коллектив единомышленников и занимался исключительно научными изысканиями и подготовкой высокопрофессиональных кадров. В 1962 г. в Москве был создан Межведомственный петрографический комитет АН СССР, в котором Дмитрий Сергеевич стал Председателем комиссии по магматическим формациям и одновременно возглавил созданную Уральскую региональную петрографическую комиссию. В 1960-е гг. при активном участии Дмитрия Сергеевича прошли первое и второе Уральские петрографические совещания и, кроме того, вышел XII том Геологии СССР, в котором он написал большую главу «Магматические формации Урала». В 1965 г. Дмитрий Сергеевич защитил докторскую диссертацию на основе своей ранее написанной монографии «О химической классификации эффузивных горных пород» (1964).

В 1960–1970 гг. он совместно с И. Д. Соболевым разработал теорию формационного деления магматических пород Урала, послужившую основой для составления металлогенических карт и примененную для этих же целей в других регионах страны. Позднее эти данные вошли в книгу Дмитрия Сергеевича с коллегами «Проблемы магматических формаций», выпущенную в 1974 г. Важные результаты были получены им при изучении ранней серпентинизации высокомагнезиальных ультрамафитов. На эту тему было опубликовано много работ, в том числе две книги в соавторстве с учениками «Серпентинизация ультрабазитов» (1977) и «Углерод в ультрабазитах и базитах» (1984). Не менее важное место в исследованиях Дмитрия Сергеевича заняли вопросы классификации магматических пород на естественно-исторической и физико-химической основе, наиболее полно освещенные в его монографии «О классификации магматитов» (1985).

В 1988 г. Дмитрий Сергеевич оставил пост зав. лаборатории и перешел на должность главного научного со-

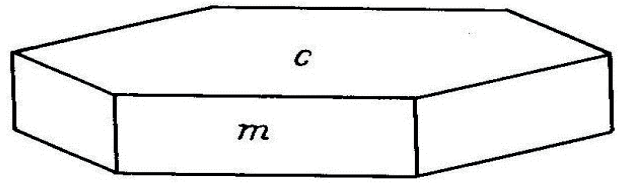


Рис. 1. Кристалл дмиштейнбергита из горелых отвалов Челябинского угольного бассейна (по работе Б. В. Чеснокова [13]).

не всем дано, да, но ставить это в вину… все равно, что обвинять рыб за то, что они умеют плавать. Про папу-членкора ты тоже не прав: Сергей Самойлович действительно был крупным ученым и возглавлял целый институт, однако умер еще до начала войны и никак не мог помочь сыну стать деканом уже после ее окончания. Что же касается отношений со студентами… теплое у него с общение с ними или прохладное – вопрос всегда спорный, все зависит от угла зрения. Что у тебя на самом деле произошло в отношениях с ним?

– Ты как всегда прав, Толя, – вздохнул Вахромеев. – Дело даже не в том, каким Штейнберг был студентом и как относится к нынешним ученикам. Мы с ним… скажем так, не сошлись во мнениях по поводу одной научной теории. Как раз связанной с космополитизмом, кстати говоря…

Сигов вдруг резко остановился.

– Ну-ка, ну-ка, поподробнее.

– Да ничего особенного, – отмахнулся Вахромеев. – Всего лишь частный разговор.

– Рассказывай, – стал настаивать Сигов. – В наше время частные разговоры порой бывают опаснее немецких пуль.

– Да зашла как-то речь о приоритете русских во всех областях науки и техники еще со времен царя Гороха, – усмехнулся тот в ответ. – Ну, сам знаешь: пионером воздухоплаванья были не братья Монгольфье, а подьячий Крякутный, построивший воздушный шар где-то под Рязанью, да и первый самолет был изобретен русским контр-адмиралом Можайским. А больше всего самородков-первооткрывателей у нас на Урале: паровоз изобрели демидовские крепостные Черепановы, радио – инженер Попов, и даже велосипед – тагильский крестьянин Артамонов. Каково, а? Штейнберг высказался в том смысле, как прекрасно, что мы поднимаем на щит собственных изобретателей, а я возразил ему, что в науке первенство остается не за теми, кто первым что-то испробовал и потерпел в итоге неудачу, а за теми, кто сумел заставить служить свое открытие человечеству.

– То есть ты высказался против Попова? – изумился Сигов.

– Да нет же, – отозвался Вахромеев. – Я всемерно уважаю Александра Степановича и ценю его вклад в развитие электротехники. Однако ж считать его изобретателем радио – явный перебор. Для всего мира это Маркони, нобелевский лауреат по физике, который построил первую радиостанцию, а не русский инженер, опыты которого были к тому же засекречены.

– И ты перед Штейнбергом также отстаивал приоритет Маркони?

– Я всего лишь высказался о том, что нужно чтить каждого ученого в соответствии с его вкладом в науку. Не больше, но и не меньше. А то мы меры-то не знаем, и

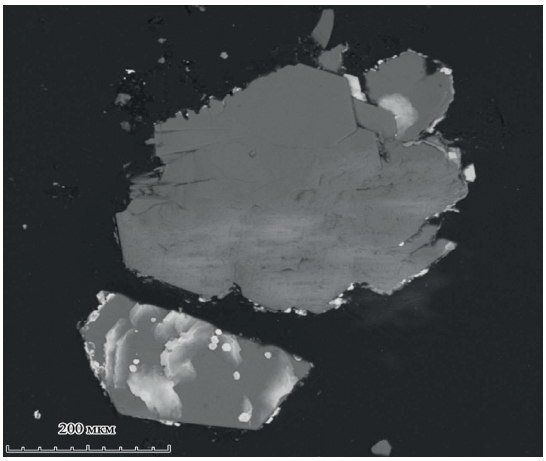


Рис. 2. Кристаллы дмиштейнбергита на подложке древесного угля. Растровый электронный микроскоп, BSE-изображение [14].

связано с тем, что сейчас большинство минералогических описаний базируется на определении минерала по данным микрозондового состава и рентгеновское изучение практически не применяется. К сожалению, химический состав дмиштейнбергита полностью идентичен анортиту, поэтому многие исследователи априори определяют минерал, как анортит. Тем более что рентгеновское изучение минералов в породе всегда связано с определенными ограничениями и затруднениями. Вполне вероятно, что дмиштейнбергит встречается гораздо чаще, чем это принято считать. Далее приведено его краткое описание на основании работы Б. В. Чеснокова с коллегами [13].

Дмиштейнбергит в виде мелких (до 0,7 мм в поперечнике) гексагональных табличек нарастает на стенки трещин в кусках древесного угля из «черных блоков». «Черные блоки» – это не прогоревшие участки внутри угольного отвала, резко выделяющиеся на фоне кирпично-красных горелых пород в экскаваторных забоях. Вещетрудника. Он продолжал активно работать, был непререкаемым авторитетом в области петрологии и в 1991 г. стал Заслуженным деятелем науки РФ. До последних дней он работал в институте и умер 10 августа 1992 г. в Екатеринбурге.

Дмитрий Сергеевич прожил долгую и интересную жизнь, целиком отданную науке и обществу. Он воспитал двух сыновей, тоже геологов. Основал современную петрологическую школу на Урале и подготовил большое количество ученых, многие из которых также сказали свое весомое слово в науке. В честь него назвали новый минерал – дмиштейнбергит (1990).

Дмиштейнбергит – гексагональный аналог анортита, найденный впервые в горелых отвалах Челябинского угольного бассейна, расположенного на Южном Урале [11, 12]. Этот минерал на данный момент установлен в углистых хондритах и других космических телах, а также в габброидах и псевдотахилитах. Распространен не так широко и является редким минералом. Возможно, это

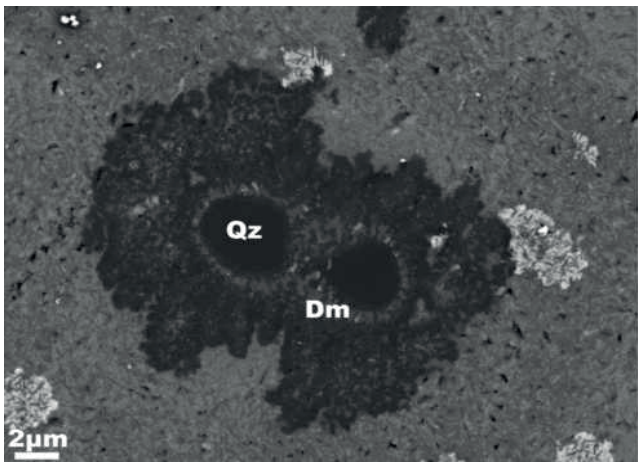


Рис. 3. Оторочки дмиштейнбергита вокруг зерен кварца в псевдотахилите. Южные Альпы, Италия, Адамелло [16].

со своим стремлением добиться отечественного приоритета в любом открытии уже готовы говорить о том, что Россия – родина слонов, основываясь лишь на том, что находим в Сибири скелеты мамонтов… Ну мы и поругались немного.

– Очень опасная точка зрения, коллега. Особенно, если ее высказывать в разговоре с начальством, – подытожил Сигов. – Остается лишь надеяться на то, что она так и останется частным разговором. Особливо с учетом того, что собрание, на которое мы идем, посвящено как раз борьбе с космополитами – то есть с такими, как ты.

Вообще-то Анатолий Павлович, сказав это, хотел таким образов свести все к шутке. Однако на этот раз оба они даже не улыбнулись, потому что им одновременно в голову пришла мысль о том, что любой частный разговор может легко стать достоянием общественности, если…

Нет, такую мысль нужно гнать из головы сразу. Или нет?

Между тем собрание, проходившее в большом зале, открывал сам директор института Николай Николаевич Толокнов – крутейший мужик, бывший военный топограф, дослужившийся в годы войны до чина инженер-майора. Слова он чеканил так, словно до сих пор не с преподавателями разговаривал, а ставил задачу своему военно-топографическому отряду, при невыполнении боевого задания грозя нерадивым штрафротой.

У такого не забалуешь, поэтому наши геологи в зале сидели уже притихшие. А между тем Николай Николаевич был краток: сказав небольшую вступительную речь, передал слово какому-то партийному работнику, которого видели здесь впервые.

Сигову выступающий, который начал, как всегда бывало в таких случаях, с идеологии «постепенного перехода к коммунизму, о котором говорит учение Ленина–Сталина», не понравился: люди именно с таким вот выражением лица запросто могли призывать к «расстреливать врагов социалистического строя без всякой пощады». Невольно поежившись, он бросил взгляд на Вахромеева, но тот выглядел совершенно спокойным.

Партиец между тем в своей речи перешел на «борьбу с буржуазными пережитками в сознании людей», а затем к «космополитическим выдумкам о надклассовой, вненациональной, «общечеловеческой» науке».

И чем дольше продолжалась эта речь, тем больше Сигову казалось, что выступающий говорит как раз на ту самую тему, которую они обсуждали с Вахромеевым, когда шли на это собрание. Поэтому, когда он сказал, что в институте «окопался затаенный враг», который ведет «активную антипатриотическую, подрывную

Рис. 4. Радиально-пластинчатый дмиштейнбергит в ассоциации с вайракитом в габброидах. Япония, о. Хонсю, префектура Гумма [15].

ство этих блоков сильно прокалено (местами до 800–900 °С) без доступа воздуха [12]. Кристаллы дмиштейнбергита имеют примитивный облик, уплощенный по базопинакоиду [0001]. Главными формами являются хорошо развитый базопинакоид c{0001} и слабо развитая гексагональная призма m{10-10} (рис. 1, 2). На гранях пинакоида отмечаются наросты спиралевидных вициналей, на гранях призмы – слабо выраженная горизонтальная штриховка. На некоторых кристаллах наблюдались наросты агрегатов гиролита.

Кристаллы беловатые до бесцветных, блеск их стеклянный, на гранях базопинакоида перламутровый, черта белая. Твердость по шкале Мооса около 6, хрупкий. Спайность очень хорошая по пинакоиду [0001], излом раковистый. Плотность минерала измерена и равняется 2,73 г/см^3. Одноосный положительный, в более толстых пластинках становится двуосным со слабым секториальным двупреломлением, Ng = 1,580(2); Np = 1,575(2); $Ng–Np$ = 0,005. Химический состав дмиштейбергита (в мас.%): SiO_2 43,89; Al_2O_3 35,39; CaO 19,29; Na_2O 0,32; K_2O 0,03; Сумма 98,93, что хорошо пересчитывается $Ca[Al_2Si_2O_8]$. Порошкограмма минерала соответствует гексагональной сингонии, пространственная группа *P6/mmm*; параметры элементарной ячейки следующие: a = 5,112(5); c = 14,781(5) Å; V = 335,83 Å^3 [13].

В 2010 г. было проведено доизучение минерала с помощью новых методов исследования, но принципиально новых данных получено не было [14]. Кристаллы дмиштейнбергита на стенках трещин в древесном угле находятся в ассоциации с кристаллами святославита, анортита, троилита, когенита, фаялита, титанита и графита. Все эти минералы образовались из газовой фазы при высокой температуре (не ниже 700–900 °С). Интересно, что совместных срастаний дмиштейнбергит, святославит и анортит не образуют и, судя по взаимоотношениям минералов, могут находиться рядом друг с другом.

Как говорилось ранее, дмиштейнбергит – минерал редкий, но на данный момент установлен в углистых хондритах и других космических телах, габброидах и псевдотахилитах. Так, он был обнаружен в габброидах префектуры Гумма

деятельность» и назвал фамилию Вахромеева, он даже уже не удивился. Каким-то новым взглядом он лишь посмотрел на президиум, где рядом с другими деканами факультетов сидел Штейнберг. Он не мог поверить, что тот мог написать донос на коллегу. Не то что бы он удивился самому факту доноса – кого этим удивишь? – но ему всегда казалось, что Шнейнберг «не из этих». А вот оказалось, что видимо, ошибся…

Между тем вокруг Вахромеева, сидевшего в зале, словно бы образовалась воронка: коллеги инстинктивно отодвигались от него, словно от зачумленного, а сам он сидел бледный как полотно.

Между тем докладчик завершил речь осуждением Вахромеева в «преклонении перед иностранщиной» и, утирая испарину со лба, потянулся к стакану с водой.

И вдруг в тишине, зависшей над залом, прямо из президиума прозвучало негромкое высказывание: «Чепуха!». Докладчик аж водой поперхнулся.

Все невольно уставились на отчаянного человека, решившегося на такую крамолу. А этот человек был Штейнберг – единственный из всех, кто решился произнести это вслух.

Прокашлявшийся партиец обернулся «Зевсом-громовержцем», да и Вахромеева это заступничество конечно же не спасло, но у Сигова словно камень упал с души.

Вскоре после этого собрания Вахромеев вынужден был уволиться из института. Однако геолога трудно напугать увольнением: с Урала он переехал в Сибирь и уже через пару лет возглавил кафедру в Иркутском политехническом институте.

Сигов проработал в Свердловском горном институте целых полвека, успешно защитив докторскую диссертацию по металлогении.

Что же касается Штейнберга, то слово, произнесенное на том собрании, стоило ему должности декана. Однако он еще восемь лет проработал в Горном, исполняя обязанности заведующего одной из кафедр, и лишь затем ушел в Институт геологии, чтобы заниматься уже только наукой. По-прежнему далеко не все коллеги любили Дмитрия Сергеевича, однако он неизменно пользовался уважением даже тех, кто его недолюбливал.

Показательный пример: в 1992 году, когда Д. С. Штейнберг умер, его коллега Александр Александрович Ефимов, у которого была веская причина его не любить после того, как тот завалил его на защите докторской, сказал с грустью: «Без него о геологии стало не с кем поговорить».

(Япония) в ассоциации с вайракитом (рис. 4) [15] и в стекловидных жилах псевдотахилита, секущих гранитоиды массива Адамелло (Италия), где дмиштейнбергит крустификационно обрастает зерна кварца (рис. 3) [16]. Кроме того, гексагональный анортит – вполне обычный минерал углистых хондритов, например, Allende (рис. 5) [17] и Northwest Africa 2086 [18], а также некоторых других хондритов.

Авторы искренне признательны Д. Д. Штейнбергу и В. В. Григорьеву за помощь при подготовке статьи.

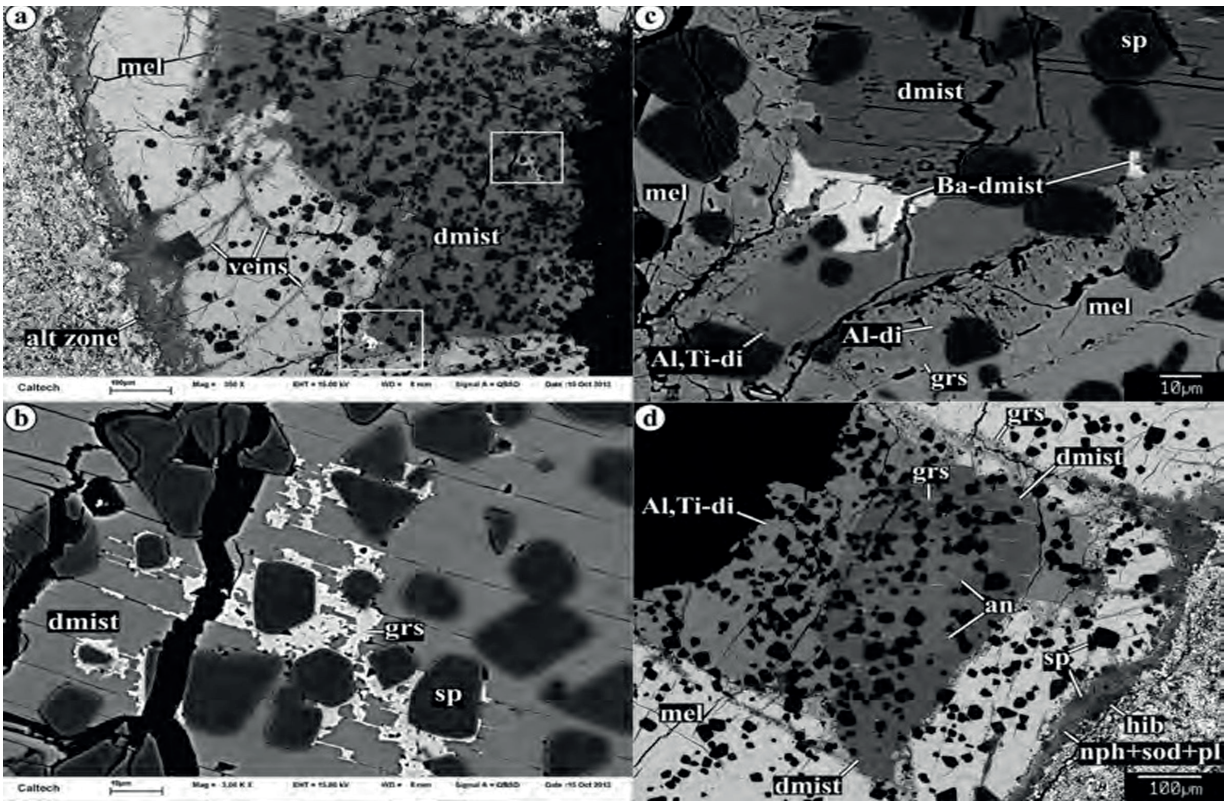


Рис. 5. Дмиштейнбергит в парагенезисе с разными минералами в CAIs-включениях. Метеорит Allende, Мексика [17]

Труды Д. С. Штейнберга, написанные и изданные во время работы в СГИ

1. Штейнберг Д. С. К вопросу о возрасте одного из тектонических нарушений в Среднем Урале // Труды и материалы Свердловского горного института, 1937.
2. Штейнберг Д. С. О классификации гранитов // Труды и материалы Свердловского горного ин-та. Свердловск, 1939. Вып. 4.
3. Штейнберг Д. С. К петрографии жильной свиты Березовского золоторудного месторождения // Труды и материалы Свердловского горного института. Свердловск, 1940. Вып. 5.
4. Штейнберг Д. С. К петрохимии гранитов Урала. Свердловск: ИГГ УФАН СССР, 1944. Вып. 3. 80 с.
5. Штейнберг Д. С. Закономерности вещественного состава гранитов Урала // Записки Уральского геол. общества. 1948. Вып. 1. С. 38–40.
6. Штейнберг Д. С. Основы петрографии без микроскопа: учеб пособие. Свердловск: Свердл. кн. изд-во, 1957. 164 с.
7. Штейнберг Д. С. Структуры горных пород: учеб. пособие для студентов. Свердловск: СГИ, 1957. 72 с.
8. Штейнберг Д. С., Кравцова Л. И., Варлаков А. С. Основные черты геологического строения Кусинской габбровой интрузии и залегающих в ней рудных месторождений // Вопросы геологии Урала. Свердловск. 1959. Т. 1. Вып. 40. С. 13–40.

Всего Д. С. Штейнбергом опубликовано около 230 работ, из них 6 монографий и 2 учебных пособия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ферштатер Г. Б., Чащухин И. С. Корифей уральской петрологии. К 100-летию Дмитрия Сергеевича Штейнберга // Литосфера. 2010. № 4. С. 170–172.
2. Штейнберг Д. Д. Вековой юбилей Д. С. Штейнберга // Уральский геологический журнал. 2010. № 2 (74). С. 15–60.
3. Иванов О. К. Эпоха Д. С. Штейнберга в изучении петрологии Урала // Уральский геологический журнал. 2010. № 2 (74). С. 61–76.
4. Маракушев А. А. Дмитрий Сергеевич Штейнберг // Магматические и метаморфические образования Урала и их металлогения. Екатеринбург: УрО РАН, 2000. С. 3–4.
5. Штейнберг Д. Д. Декаданс в геологии // Уральский геологический журнал. 2010. № 4 (76). С. 70–94.
6. Ферштатер Г. Б., Рапопорт М. С., Чащухин И. С. Научное наследие Д. С. Штейнберга // Актуальные проблемы магматической геологии, петрологии и рудообразования: сборник статей. Екатеринбург: Уралгеолком, 1995. С. 4–9.
7. Ферштатер Г. Б., Чащухин И. С., Бородина Н. С. Штейнберг, сын Штейнберга. К 90-летию Д. С. Штейнберга // Наука Урала, 2000. № 6. С. 2, 7.
8. Ферштатер Г. Б., Чащухин И. С., Левин В. Я., Золоев К. К. Д. С. Штейнберг (1910–1992) // Воспоминания об ученых Института геологии и геохимии. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2012. С. 70–78.
9. Холоднов В. В. «Три кита» петролога. Профессору Д. С. Штейнбергу – 80 лет // Наука Урала, 1990.
10. Филатов В. В. «Отечества пользы для…» (75 лет Уральскому горному институту). Екатеринбург: УГИ, 1992. 408 с.
11. Чесноков Б. В., Щербакова Е. П. Минералогия горелых отвалов Челябинского угольного бассейна (опыт минералогии техногенеза). М.: Наука, 1991. 152 с.
12. Чесноков Б. В., Михаль Т. А., Дерябина Т. Н. Типы техногенной минерализации отвалов Челябинского угольного бассейна // Минералы месторождений Южного и Среднего Урала: сборник статей. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1985. С. 47–58.
13. Чесноков Б. В., Лотова Э. В., Павлюченко В. С., Усова Л. В., Бушмакин А. Ф., Нишанбаев Т. П. Дмиштейнбергит $CaAl_2Si_2O_8$ (гексагональный) – новый минерал // Записки ВМО, 1990. Ч. 119. Вып. 5. С. 43–46.
14. Симакин А. Г., Еремяшев В. Е., Кучериненко Я. В. Новые данные о дмиштейнбергите // Записки РМО. 2010. № 3. С. 102–108.
15. Yamada S. Nihonsan-koubutsu Gojuon-hairetsu Sanchi-ichiranhyou. 2004. 111 p.
16. Nestola F., Mittempergher S., Di Torro G., Zorzi F., Pedron D. Evidence of dmisteinbergite (hexagonal form of $CaAl_2Si_2O_8$) in pseudotachylyte: A tool to constrain the thermal history of a seismic event // American Mineralogist, 2010. Vol. 95. P. 405–409.
17. Ma C., Krot A. N., Bizzarro M. Discovery of dmisteinbergite (hexagonal $CaAl_2Si_2O_8$) in the Allende meteorite: A new member of refractory silicates formed in the solar nebula // American Mineralogist. 2013. Vol. 98, number 7. P. 1368–1371. https://doi.org/10.2138/am.2013.4496
18. Fintor K., Park C., Nagy S., Pál-Molnár E., Krot A. N. Hydrothermal origin of hexagonal $CaAl_2Si_2O_8$ (dmisteinbergite) in a type A CAI from the Northwest Africa 2086 CV3 Chondrite // Meteoritics & Planetary Science. 2014. Vol. 49, № 5. P. 812–823. https://doi.org/10.1111/maps.12294

The works of D. S. Steinberg written and published while working at the Mining Institute

1. Steinberg D. S. 1937, About the age of one of the tectonic disturbances in the Middle Urals. Works and materials of the Sverdlovsk Mining Institute.
2. Steinberg D. S. 1939, About the classification of granites. Works and materials of the Sverdlovsk Mining Institute. Sverdlovsk, issue 4.
3. Shteinberg D. S. 1940, On the petrography of the vein suite of the Berezovsky gold ore deposit. Works and materials of the Sverdlovsk Mining Institute. Sverdlovsk, issue 5.
4. Steinberg D. S. 1944, On the petrochemistry of granites of the Urals. Sverdlovsk, issue 3, 80 p.
5. Steinberg D. S. 1948, Regularities of the material composition of granites of the Urals. Proceedings of the Ural Geological Society., issue. 1, pp. 38–40.
6. Steinberg D. S. 1957, Fundamentals of petrography without a microscope: textbook. Sverdlovsk, 164 p.
7. Steinberg D. S. 1957, Structures of rocks: textbook manual for students. Sverdlovsk, 72 p.
8. Shteinberg D. S., Kravtsova L. I., Varlakov A. S. 1959, The main features of the geological structure of the Kusinskaya gabbro intrusion and laying ore deposits. Questions of geology of the Urals. Sverdlovsk. vol. 1. issue 40, pp. 13–40.

In total, D. S. Steinberg published about 230 works; among them are 6 monographs and 2 study guides.

REFERENCES

1. Fershtater G. B., Chashchukhin I. S. 2010, A hard-liner on the Ural Petrology. To the 100th anniversary of Dmitry Sergeyevich Steinberg. *Litosfera* [Lithoshere], no. 4, pp. 170–172. (*In Russ.*)
2. Steinberg D. D. 2010, Centenary of D. S. Steinberg. *Ural'skiy geologicheskiy zhurnal* [Uralian Geological Journal], no. 2 (74), pp. 15–60. (*In Russ.*)
3. Ivanov O. K. The era of D. S. 2010, Steinberg in the study of petrology of the Urals. *Ural'skiy geologicheskiy zhurnal* [Uralian Geological Journal], no. 2 (74), pp. 61–76. (*In Russ.*)
4. Marakushev A. A. Dmitry Sergeyevich Steinberg. 2000, *Magmaticheskiye i metamorficheskiye obrazovaniya Urala i ikh metallo-geniya* [Magmatic and metamorphic formations of the Urals and their metallogeny], Ekaterinburg, pp. 3–4.
5. Steinberg D. D. 2010, Decadence in Geology. *Ural'skiy geologicheskiy zhurnal* [Uralian Geological Journal], no. 4 (76), pp. 70–94. (*In Russ.*)
6. Fershtater G. B., Rapoport M. S., Chashchukhin I. S. 1995, Scientific heritage of D. S. Steinberg. Actual problems of magmatic geology, petrology and ore formation: collection of articles. Ekaterinburg, pp. 4–9.
7. Fershtater G. B., Chashchukhin I. S., Borodina N. S. 2000, *Shteynberg, syn Shteynberga. K 90-letiyu D. S. Shteynberga* [Steinberg, son of Steinberg. On the 90th anniversary of D. S. Steinberg], no. 6, pp. 2, 7.

8. Fershterter G. B., Chashchukhin I. S., Levin V. Ya., Zoloev K. K. 2012, D. S. Steinberg (1910–1992). Memoirs of scientists from the Institute of Geology and Geochemistry. Ekaterinburg, pp. 70–78.
9. Kholodnov V. V. 1990, *«Tri kita» petrologa. Professoru D. S. Shteynbergu – 80 let* [“Three whales” of a petrologist. Professor D. S. Steinberg is 80 years old].
10. Filatov V. V. 1992, “Fatherland is good for ...” (75 years of the Ural Mining Institute). Ekaterinburg, 408 p.
11. Chesnokov B. V., Shcherbakova Ye. P. 1991, *Mineralogiya gorelykh otvalov Chelyabinskogo ugol'nogo basseyna (opyt mineralogii tekhnogeneza)* [Mineralogy of burning dumps of the Chelyabinsk coal basin (experience of technogenesis mineralogy)]. Moscow, 152 p.
12. Chesnokov B. V., Mikhal T. A., Deryabina T. N. 1985, Types of technogenic mineralization of dumps in the Chelyabinsk coal basin. Minerals of deposits in the Southern and Middle Urals: collection of articles. Sverdlovsk, pp. 47–58.
13. Chesnokov B. V., Lotova E. V., Pavlyuchenko V. S., Usova L.V., Bushmakin A. F., Nishanbaev T. P. 1990, Dmisteinbergite $CaAl_2Si_2O_8$ (hexagonal) – a new mineral. *Zapiski RMO* [Proceedings of the Russian Mineralogical Society], p. 119, issue 5, pp. 43–46. (*In Russ.*)
14. Simakin A. G., Eremyashev V. E., Kucherinenko Ya. V. 2010, New data on dmisteinbergite. *Zapiski RMO* [Proceedings of the Russian Mineralogical Society], no. 3, pp. 102–108. (*In Russ.*)
15. Yamada S. 2004, Nihonsan-koubutsu Gojuon-hairetsu Sanchi-ichiranhyou, 111 p.
16. Nestola F., Mittempergher S., Di Torro G., Zorzi F., Pedron D. 2010, Evidence of dmisteinbergite (hexagonal form of $CaAl_2Si_2O_8$) in pseudotachylyte: A tool to constrain the thermal history of a seismic event. *American Mineralogist*, vol. 95, pp. 405–409.
17. Ma C., Krot A. N., Bizzarro M. 2013, Discovery of dmisteinbergite (hexagonal $CaAl_2Si_2O_8$) in the Allende meteorite: A new member of refractory silicates formed in the solar nebula. *American Mineralogist*, vol. 98, number 7, pp. 1368–1371. https://doi.org/10.2138/am.2013.4496
18. Fintor K., Park C., Nagy S., Pál-Molnár E., Krot A. N. 2014, Hydrothermal origin of hexagonal $CaAl_2Si_2O_8$ (dmisteinbergite) in a type A CAI from the Northwest Africa 2086 CV3 Chondrite. *Meteoritics & Planetary Science*, vol. 49, no. 5, pp. 812–823. https://doi.org/10.1111/maps.12294

Статья поступила в редакцию 28 августа 2019 г.

Известия Уральского государственного горного университета. 2019. Вып. 3(55). С. 187-190

Памятник Анри Барбюсу (история создания)

Владимир Викторович ФИЛАТОВ*
Владимирский государственный университет,
Россия, Владимир
*filatov47@bk.ru

Vladimir Viktorovich FILATOV*
Vladimir State University
Vladimir, Russia
*filatov47@bk.ru

In the spring of 1936, the Central Committee of the USSR Ministry of Natural Resources, announced a competition for the design of a monument to the outstanding French writer and communist A. Barbyus. The first prize and the right to create a monument received the Sverdlovsk residents K. P. Trofimov, V. A. Kikin and A. A. Antipin. The monument was made by the Ural stone-cutting masters from Ural gemstones: rhodonite, marble and jasper, the searches, mining and transportation of which were carried out by the famous Ural mining worker G.G. Kitaev.Work on the monument was completed in August 1936. The unassembled monument was transported to Paris and on September 13 was inaugurated in the presence of fifty thousand workers of Paris at the Pere Lachaise cemetery.

Keywords: Henri Barbusse, gravestone at the Pere Lachaise cemetery, Ural mountain-goers and stone-cutters.

Весной 1936 г. ЦК МОПР СССР объявило конкурс на проект памятника выдающемуся французскому писателю-коммунисту А. Барбюсу. Первую премию и право создать памятник получили свердловчане К. П. Трофимов, В. А. Кикин и А. А. Антипин. Памятник был выполнен уральскими мастерами-камнерезами из уральских поделочных камней: родонита, мрамора и яшмы, поисками, добычей и транспортировкой которых занимался известный уральский горщик Г. Г. Китаев. Работа над памятником была закончена в августе 1936 г. В разобранном виде памятник был перевезён в Париж и 13 сентября торжественно открыт в присутствии пятидесяти тысяч трудящихся Парижа на кладбище Пер-Лашез.

Ключевые слова: Анри Барбюс, надгробье на кладбище Пер-Лашез, уральские горщики и камнерезы.

Метафорически Советский Союз был мировым «диполем», поскольку притягивал к себе с огромной силой как разнополярные полюсы и недругов, и доброжелателей. О недругах умолчу. Среди доброжелателей, тех, кто относился к Советскому Союзу с искренним восхищением, было немало выдающихся интеллектуалов Западной Европы. Например, Бернард Шоу, приезжавший в 1931 г. в Москву. Вернувшись из поездки, он поделился впечатлениями от увиденного с соотечественниками, сказав им: «Из земли надежды я вернулся в мир безнадежности». Соотечественники его не поняли.

Непритворный интерес к нашей стране был и у французского писателя-коммуниста Анри Барбюса. Он несколько раз был в Советском Союзе. Последняя поездка закончилась для него трагически. Барбюс умер в Москве от пневмонии 30 августа 1935 г. Его похоронили в Париже на кладбище Пер-Лашез, недалеко от стены, возле которой в 1871 г. были расстреляны последние коммунары.

Чтобы увековечить память о покойном, ЦК МОПР СССР объявил в марте 1936 г. конкурс на создание надгробья. В конкурсе приняли участие и свердловчане: художник К. П. Трофимов, скульптор В. А. Кикин и инженер-архитектор А. А. Антипин. Они получили за свой проект первую премию и право на создание надгробья.

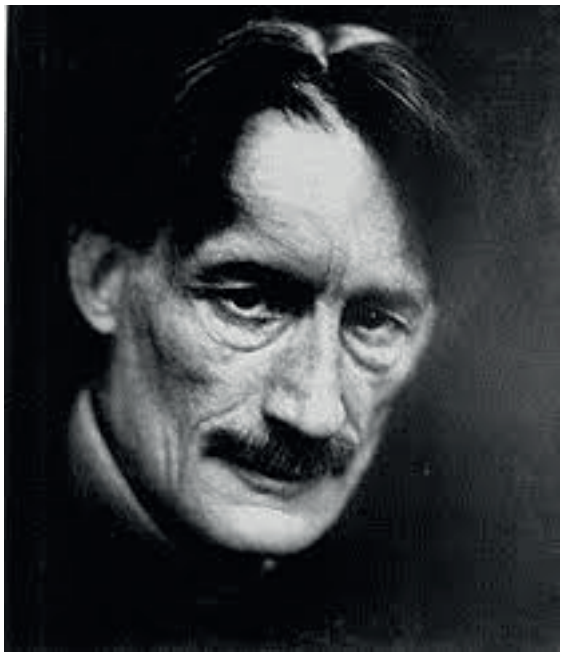


Рисунок 1. Портрет А. Барбюса (1873—1935)

Барбюс мечтал побывать на Урале – «в крае активнейшего социалистического строительства». Но эта поездка не состоялась. Об Урале ему напоминал подарок уральцев – образец малахита. А в ноябре 1929 г. он прислал в Свердловск телеграмму, текст который был опубликован в областной газете «Уральский рабочий»: «В день 12-й годовщины Октября шлю искренний пламенный привет рабкорам и журналистам газеты «Уральский рабочий» и всем трудящимся» [1].

Надгробье, выполненное уральскими мастерами-камнерезами из уральских поделочных камней, как будто бы стало посмертным исполнением желания великого писателя.

Авторы проекта надгробья были одаренными и образованными, с широким кругозором и эрудицией. Уроженец Тюмени Константин Павлович Трофимов (1885–1944) окончил в 1911 г. Строгановское художественно-промышленное училище; его учителями и коллегами были художники и архитекторы С. В. Иванов, Н. А. Андреев, Е. Е. Лансере, И. В. Жолтовский. Нижегородец Андрей Викторович Кикин (1898–1963) окончил с золотой медалью Нижегород-

Рисунок 2. Двор гранильной фабрики. Мастера фабрики возле глыбы родонита.

ский Александровский Дворянский Институт и ВХУТЕИН. Александр Алексеевич Антипов (1901–?) – коренной екатеринбуржец, выпускник строительного факультета Уральского практического института и Московского Высшего инженерно-строительного училища.

Каждый из них, безусловно, был знаком с творчеством Анри Барбюса, читал его книги, издававшиеся в Советском Союзе большими тиражами. Замысел авторов проекта – это воплощение в камне гуманистических идей писателя, выраженных с такой убедительной ясностью, образностью, лаконичностью, нетривиальностью и мастерством, что члены конкурсной комиссии просто не могли не присудить им первое место.

Что же представлял собой замысел авторов надгробья? Все его детали были в форме прямоугольных параллелепипедов с различными соотношениями длин ребер: никаких закруглений, завитков, рокайлов и символов равнодушия – овалов. Потому что авторы, как и Барбюс, по-видимому, исповедовали принцип бескомпромиссности к себе, к людям, к обстоятельствам, образную форму которому дал советский поэт-романтик Павел Коган: «Я с детства не любил овал/Я с детства угол рисовал». В основании надгробья лежала прямоугольная плита-монолит; на ее краю вдоль короткой стороны находилось каре из разновысоких блоков, из которого вырастала вертикальная плита-стела.

Форма деталей надгробья, размеры, их пространственное положение и взаимоотношения имели большое значение для реализации замысла авторов. Но главная роль принадлежала цвету: плита черная, блоки каре темно красные, черные, бордовые, стела розовая. Почему?

Ни один из авторов надгробья не рассказал о том, как рождался их замысел. Поэтому интерпретация цветового решения надгробья принадлежит мне. Этой мой домысел, моя фантазия.

Творчество Барбюса заключено между двумя его произведениями-полюсами: на одном роман «Огонь», на другом рассказ «Нежность». Огонь войны, ад которой пережил Барбюс, сжигает все живое и неживое, превращая в угольно-черный прах. Но война не вечна. Огонь, исчерпав свою безжалостную силу, погасает. И на растерзанной земле, в опаленных огнем душах людей начинает возрождаться жизнь, нежная, розовая, как утренняя заря. Без трагедии «Огня» не было бы жертвенной «Нежности» жизни.

Замысел надгробья, каким бы он ни был талантливым, необходимо было воплотить в камне. Поисками необходимых по цвету камней, их транспортировкой в Свердловск, раскроем и распиловкой, обдиркой, шлифовкой и полировкой блоков (иные из них весили несколько тонн) занимались десятки специалистов из различных организаций: промартель «Мраморский кустарь», камнеобрабатывающая мастерская «Домтяжпромурала», Свердловская гранильная фабрика, фабрика «Союзштамп», контора треста «Союзминералснабсбыт», Свердловский аффинажный завод, Каслинский завод, Уральское территориальное геологическое управление, контора треста «Цветмет». Всеми работами по изготовлению надгробья руководил главный инженер «Домтяжпромурала» А. А. Антипин.

Основание надгробья сделали из блоков редкой не только для Урала разновидности мрамора черного цвета с резкими стреловидными, светлыми прожилками, месторождение которого находится возле села Першино в Режевском районе. Поэтому мрамор называют режевским. Цвет и рисунок мрамора как нельзя лучше отвечал замыслу авторов надгробья. Он был как будто бы предвосхищен в романе «Огонь»: *«… Черное грозовое небо тихонько приоткрывается. Между двух темных туч возникает спокойный просвет, и эта узкая полоска, такая скорбная, что кажется мыслящей, все-таки является вестью, что солнце существует»* [2].

Блоки, образующие каре, были выпилены из яшмы, месторождений которой немало на Урале. Ее цвет и рисунок имитировали клубы черного дыма, прорезанные языками пламени.

Контрапунктом надгробья были два блока стелы: одна высокая, вторая низкая. Горные породы розового цвета, предполагавшиеся использовать для их изготовления, многочисленны: гранит, мрамор, кварцит и другие. Но для блоков стелы предпочли использовать красивейший камень родонит-орлец, уступавший по значимости в камнерезном и ювелирном искусстве только малахиту. Сделать стелу из родонита предложил Григорий Георгиевич Китаев, который был дружен с академиком А. Е. Ферсманом, ценившим Григория Георгиевича как великолепного знатока месторождений камнецветного сырья Урала. Китаев «присмотрел» на Мало-Сидельниковском месторождении многотонную глыбу родонита. Извлек ее с помощью рабочих из горной выработки и привез в Свердловск на двор гранильной фабрики. Благо, что расстояние от месторождения до Свердловска небольшое, чуть более двадцати километров.

Геолог А.Н. Игумнов осматривает монолиты горных пород, предназначенные для изготовления памятника.

История открытия и освоения этого уникального месторождения началась в конце XVIII в. Первооткрывателем был крестьянин Арамильской слободы Никита Партин. При разведке месторождения были выявлены две продуктивные зоны, которые стали разрабатывать двумя копями: Большой и Малой. Наиболее ценный родонит был в Большой орлецовой копи в виде скопления сплошной тонкозернистой массы розового цвета с полупрозрачными вкраплениями малинового и темно-красного цветов. Месторождения родонита нередки. Они открыты в различных регионах мира, но только родонит Мало-Сидельниковского месторождения обладал качествами мирового уровня.

Минерал родонит – это силикат марганца. Название минерала, происходящее от греческого слова *rhodon*, что значит роза, было перенесено на горную породу, состоящую из смеси нескольких марганцевых минералов. Прихотливый рисунок родонита в виде «веточек» черных дендритов образуют окислы марганца. Орлец – уральское название родонита. На Мало-Сидельниковском месторождении он встречался глыбами весом в несколько десятков тонн. Из одной такой глыбы весом в 47 т был выпилен семитонный саргофаг императрицы Марии Александровны, матери императора Николая II.

Надгробье было решено установить в годовщину захоронения Барбюса, т. е. 7 сентября 1936 г. Времени для его изготовления было мало. Главная трудность заключалась в распиловке камней, в их шлифовке и полировке, особенно родонита и яшмы из-за их высокой твердости. Нормы распиловки для них составляли 2–3 см в сутки; нормы шлифовки и полировки – 0,02 м^2. Благодаря рационализации скорость распиловки увеличили до 8–9 см, а шлифовки и полировки – до 0,53 м^2 [3, 4].

Рисунок 4. Памятник А. Барбюсу на кладбище Пер-Лашез.

Одновременно с изготовлением блоков был выполнен бронзовый барельеф писателя по слепку посмертной маски. Слепок сделал приезжавший в Москву друг Барбюса скульптор Н. Арансон. Этот слепок послужил А. В. Кикину основой для изготовления макета барельефа. Используя макет, мастера Каслинского завода формовщик М.В. Торокин и чеканщики Д. И. Широков и М. О. Глухов под руководством скульптора Н. Н. Горского сделали отливку барельефа.

Последними деталями надгробья стали накладные буквы и цифры, укрепленные на фасадной стороне одного из блоков стелы: «Henri Barbusse 1873–1935», и позолоченные пластинки, прикрепленные к яшмовым блокам, на которых был выгравирован следующий текст: *«Другу рабочего класса Франции, достойному сыну французского народа, другу трудящихся всех стран, глашатаю единого фронта трудящихся против империалистической войны и фашизма. Товарищу Анри Барбюсу от трудящихся Урала (СССР)»*.

Вот и все. Оставалось только исполнить положенное в таком случае ритуальное мероприятие и отправить надгробье в Париж. 23 августа была закончена сборка надгробья, и его приняла комиссия во главе с А. Е. Ферсманом. На следующий день во дворе «Домтяжпромурала» состоялся митинг. Потом надгробье разобрали, упаковали и через Ленинград увезли в Париж [5].

О том, что произошло в Париже 13 сентября на кладбище Пер-Лашез, было напечатано в газете «Уральский рабочий» в конце октября в двух небольших заметках. Эти заметки составлены на основе текстов радиограммы членов комитета по сооружению памятника А. Барбюсу и копии письма вдовы А. Барбюса. И радиограмма, и письмо были присланы председателю ЦК МОПР СССР (председателем ЦК МОПР СССР в 1927–1937 гг. была Е. Д. Стасова), который переслал их в Свердловский Облисполком. В радиограмме и письме говорилось следующее:

«От имени комитета по сооружению памятника Анри Барбюсу и пятидесяти тысяч парижских трудящихся, присутствовавших при открытии великолепного памятника, присланного трудящимися Урала, передайте поздравления и благодарность рабочим Свердловска, приславшим этот дар. Этому примеру последуют французские товарищи, которые воздвигнут в Париже памятник своему мужественному защитнику. Франсис Журден, Дютийель Рабат, Аннет Видаль» [6].

«Дорогой друг, сейчас же после грандиозного шествия к Пер-Лашез, в знак уважения к нашему Анри Барбюсу и прекрасному произведению великих художников и трудящихся СССР, хочу выразить Вам всю признательность испытываемую нами всеми, и особенно моей золовкой и мной. Благодарю Вас, дорогой друг за то, что Вы с такой любовью занимались осуществлением этого дела. Я не имею возможности написать ни художникам, ни их сотрудникам и мы просим Вас выразить им за нас наше восхищение и нашу признательность. Те, которые массами вышли вчера, видели там великий пример верности и утешения. Прошу Вас передать всем нашу братскую и полную восхищения благодарность. Признательная Вам Эли Анри Барбюс».

Памятник находился еще в трюме корабля, шедшего во Францию, когда Свердловский Облисполком «отметил исключительное качество работы» по его исполнению и наградил более двадцати человек почетными грамотами, благодарностями, путевкой на курорт и денежной премией в размере оклада [7].

С тех пор минуло 80 лет. Сколько событий прошло за эти годы. И каких! Чем был 80 лет назад памятник? Символом пролетарского интернационализма и выдающимся произведением камнерезного искусства уральских мастеров. Спустя 80 лет, когда идеологическое клише поблекло, то, что было сделано на Урале, стало просто памятником на могиле великого французского писателя Анри Барбюса и … выдающимся произведением камнерезного искусства уральских мастеров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Уральский рабочий. 1929. 10 ноября (№ 257).
2. Барбюс А. Огонь (Дневник взвода): пер. с франц. В. Парнах; предисл. М. Горького. М.: Правда, 1982. С. 315.
3. Постановление Президиума Свердловского областного Совета рабочих, крестьянских и красноармейских депутатов № 5611 от 28 августа 1936 г.
4.Уральский рабочий. 1936. 28 августа (№ 198).
5. Уральский рабочий. 1936. 26 августа (№ 196).
6. Уральский рабочий. 1936. 24 сентября (№ 222).
7. Уральский рабочий. 1936. 2 октября (№ 227).

REFERENCES

1. Ural'skiy rabochiy, 1929, November, 10, no. 257.
2. Barbusse H. Fire. Moscow, Pravda, 1982, p. 315.
3. Resolution of the Presidium of the Sverdlovsk Regional Council of Workers, Peasants and Red Army Deputies, no. 5611, August 28, 1936.
4. Ural'skiy rabochiy, 1936, August 28, no. 198.
5. Ural'skiy rabochiy, 1936, August 26, no.196.
6. Ural'skiy rabochiy, 1936, September 24, no. 222;
7. Ural'skiy rabochiy, 1936, October 02, no. 227.

Статья поступила в редакцию 22 августа 2019 г.

Уважаемые авторы!

Журнал «Известия УГГУ» публикует результаты научных исследований российских и зарубежных авторов на русском или английском языках.

К рассмотрению принимаются рукописи, снабженные следующими необходимыми компонентами.

1. Текст статьи на русском или английском языке (либо двуязычный) в электронном виде. Статьи принимаются на электронную почту редакции: **iuggu-journal@yandex.ru** либо при помощи электронной редакции на сайте iuggu.ru. Не допускается направление в редакцию статей, уже публиковавшихся или посланных на публикацию в другие журналы. Необходимо указывать номер УДК.

2. Аннотация и ключевые слова. Объем аннотации должен составлять 200–250 слов, ключевых слов должно быть не менее 5. По аннотации читатель должен определить, стоит ли обращаться к полному тексту статьи для получения более подробной, интересующей его информации. Стоит воздержаться от второстепенной информации и выражать мысли возможно более лаконично.

В аннотации должны быть четко прописаны: актуальность, цель работы, метод или методология проведения работы, результаты работы и область их применения; выводы (при необходимости).

Текст статьи должен быть структурирован в соответствии с аннотацией и содержать конкретные разделы: введение, результаты и их применение, выводы (при необходимости), заключение.

Перевод аннотации, ключевых слов и списка литературы на английский язык осуществляется авторами, только если они уверены в качестве перевода, если же нет – перевод осуществляется редакцией. Перевод с помощью электронных переводчиков не принимается.

3. Список литературы на русском и английском языках. Ссылки на источники должны идти в тексте по порядку – 1, 2, 3. В тексте ссылки заключаются в квадратные скобки. Количество ссылок в тексте должно соответствовать количеству источников литературы в списке. Упоминания ГОСТ, СНиП, правил безопасности, нормативных, законодательных и других документов, отчетов о НИР, а также ссылок на неофициальные источники в Интернет необходимо приводить в тексте статьи или в сносках, не вынося в список литературы. Обязательно отражение в статье мирового опыта по рассматриваемому вопросу, список литературы должен содержать современные зарубежные статьи (не ранее 2013 года издания). Список литературы должен содержать не менее 15 источников, из которых должно быть не более 2 собственных работ автора. Наличие в списке литературы учебников, учебных и методических пособий, указаний по курсовому и дипломному проектированию, конспектов лекций для студентов не допускается.

При оформлении списка литературы у ВСЕХ публикаций, имеющих DOI (особенно это касается иностранных публикаций), эти DOI должны быть указаны (в виде гиперссылок). Пример оформления: 10. Henry D.J., Novák M., Hawthorne F.C., Ertl A., Dutrow B.L., Uher P., Pezzotta F. Nomenclature of the tourmaline-supergroup minerals // American Mineralogist, 2011. Vol. 96. P. 895-913. https://doi.org/10.2138/am.2011.3636. Ссылки должны быть работающие!

4. Сведения об авторах. Необходимо указать для каждого автора на русском и английском языках ФИО, должность, ученую степень и звание, место работы (учебы) с указанием полного почтового адреса, контактный e-mail, контактный телефон, номер ORCID ID (аккаунт ORCID обязательно должен содержать информацию о месте работы автора и актуализированный перечень публикаций).

5. Экспертное заключение о возможности опубликования. В сканированном или распечатанном виде.

6. Согласие на обработку персональных данных. Можно как прислать в сканированном виде, так и принести в редакцию. Бланк можно взять в редакции.

Плата за публикацию с авторов научно-технических статей, включая аспирантов, в порядке общей очереди не взимается.

Оформление статей

1. Редактор Microsoft Word, гарнитура Minion Pro. Поля документа: левое 2 см, остальные – 1,5 см. Кегль 10, одинарный интервал. Абзацный отступ 0,63. Страницы нумеруются. Не допускаются пробелы между абзацами.

2. В тексте допускаются только общепринятые сокращения слов. Все сокращения в тексте, рисунках, таблицах должны быть расшифрованы.

3. Формулы должны быть набраны в редакторе Microsoft Equation и пронумерованы, если в тексте имеются ссылки на них. При наборе формул и текста латинские буквы выделяют курсивом, а русские, греческие и цифры – прямым шрифтом. Кегль шрифта в формулах должен совпадать с кеглем шрифта основного текста. Тригонометрические знаки (sin, cos, tg, arcsin и т. д.), знаки гиперболических функций (sh, ch, th, cth и т. д.), обозначения химических элементов (Al, Cu, Na и т. д.), некоторые математические термины (lim, In, arg, grad, const и т. д.), числа или критерии (Re – Рейнольдса и т. д.), названия температурных шкал (°C – градусы Цельсия и т. д.) набираются прямым шрифтом.

4. Физические единицы приводятся в системе СИ.

Графический материал

Рисунки, карты, чертежи предоставляются в электронном и бумажном виде, в цветном и/или черно-белом исполнении. Изображения должны быть четкими, контрастными. Таблицы и схемы должны быть пригодными для правки. Таблицы и схемы, сканированные как изображения, не принимаются.

На картах обязательно указывается масштаб. На чертежах, разрезах, картах должно быть отражено минимальное количество буквенных и цифровых обозначений, а их объяснение – в подрисуночных подписях. Ксерокопии и сканированные ксерокопии фотографий не принимаются. Рисунки с нечитаемыми или плохо читаемыми надписями, с подписями «от руки», слишком тонкими линиями не принимаются.

Подрисуночная подпись должна быть набрана 8 кеглем, основной текст в таблице – 8 кеглем, шапка таблицы – 8 кеглем. Гарнитура текста в рисунках и таблицах – Arial, кегль 8.

Все статьи подлежат двойному слепому рецензированию, мнение рецензента всегда доводится до сведения автора.

Примеры оформления списка литературы

Монографии

Исимару А. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. М.: Мир, 1981. 280 с.

Статьи в периодических изданиях

Абатурова И. В., Грязнов О. Н. Инженерно-геологические условия месторождений Урала в скальных массивах // Изв. вузов. Горный журнал. 2014. № 6. С. 160–168.

Авторефераты, диссертации

Овечкина О. Н. Оценка и прогноз изменения состояния геологической среды при техногенном воздействии зданий высотной конструкции в пределах города Екатеринбурга: автореф. … дис. канд. геол.-минерал. наук. Екатеринбург: УГГУ, 2013. 24 с.

Сушко А. Е. Разработка специального математического и программного обеспечения для автоматизированной диагностики сложных систем: дис. … канд. техн. наук. М.: МИФИ, 2007. 170 с.

Зарубежные исследования

Hudson J. A. The Scattering of Elastic Waves by Granular Media. Quart Journal Mech. and Applies Math. 1968. Vol. XXI. Pt. 4. pp. 487–502.

Сетевые источники

Биржевой навигатор. URL: http://stock-list.ru/natural-gas.html

Памятка для авторов

Научный журнал не может (и не должен) развиваться только силами редакции. Поэтому, предъявляя новые требования к себе, мы предъявляем их и к авторам, которые хотят публиковаться в нашем журнале.

Требования к оформлению высылаемых рукописей мы публикуем на нашем сайте, а также на последней станице каждого нового выпуска. Здесь мы не будем повторять все это, лишь расскажем о нововведениях, которые нам представляются наиболее важными.

Аннотация. Как на русском, так и на английском языках аннотации сейчас принимаются только расширенные – не менее 200 слов. Делается это для того, чтобы читатель (в том числе иностранный) мог в считанные минуты понять, о чем данная статья и представляет ли она для него интерес.

Список литературы. К сожалению, публикации в советских журналах традиционно отличались от иностранных меньшим числом источников. Кроме того, отечественные ученые зачастую не утруждают себя изучением иностранных публикаций на интересующую тему. Также часты использования в качестве источников различных учебников, методичек и пр. Все это значительно снижает уровень публикаций. Поэтому мы взяли за правило рекомендовать авторам расширять список литературы до 10–15 источников с обязательным использованием современных зарубежных публикаций. Исключения возможны, но они должны быть обоснованными.

DOI. Помимо ставшего уже привычным для авторов присваиваемого каждой статье номера УДК, начиная со второго номера 2016 года каждой статье в обязательном порядке присваивается номер DOI.

DOI (*англ.* Digital object identifier) – классификатор цифрового объекта для создания постоянных гиперссылок, которые позволяют сохранять информацию о конкретной статье в сети Интернет, даже если изменилась структура сайта, где эта статья изначально была сохранена.

Проще говоря, номер DOI позволяет научной статье гарантированно открываться и быть доступной для поиска в сети, что совершенно необходимо для того, чтобы статья могла цитироваться с помощью Интернета, не затрудняя авторов поисками ее в библиотеках и архивах – своего рода дань современным IT-технологиям.

Редакцией «Известий УГГУ» заключен договор с Некоммерческим партнерством «Национальный Электронно-Информационный консорциум» (НП НЭИКОН), которое предоставляет в России посреднические услуги по присвоению DOI от регистрационного агентства (DOI Registration Agency) CrossRef. Это самый современный центр регистрации Международной организации документации, основной задачей которого является организация доступа пользователей к первичным публикациям, содержащим научный контент, и содействие коллективной работе издателей по всему миру. Эту кооперативную справочную систему сейчас используют большинство научных журналов в мире.

DOI обязательно указывается при цитировании статьи. В журнале «Известия УГГУ» DOI сейчас присваивается каждой вновь вышедшей статье. Также номер DOI может быть присвоен любой из статей, которые ранее публиковались в нашем журнале – но уже не в обязательном порядке, а по желанию авторов. Для желающих достаточно сделать заявку в редакцию.

Качество перевода. Нас не устраивает перевод аннотаций (и уж тем более – статей) с помощью электронных переводчиков. Если вы не уверены в своем переводе, лучше обратитесь за помощью в редакцию. Лучше не предоставить никакого перевода, чем перевод низкого качества.

Качество рисунков. Рисунок должен оставаться качественным при увеличении. Не забывайте о том, что статья будет опубликована не только в бумажной, но и в электронной версии.

Качество текстов. При рассмотрении рукописи авторитет и заслуги автора статьи во внимание не принимаются – только качество присланного текста. Для этого введено двойное слепое рецензирование.

Слепое рецензирование. Два рецензента оценивают качество статьи, не зная, кто ее автор. В случае, если рецензент узнает автора, то рукопись автоматически передается другому рецензенту – из числа экспертов, сотрудничающих с журналом. Делается это для того, чтобы личные отношения не влияли на качество рецензии. Автор также не знает своего рецензента.

Помимо этого, правила публикации текстов предполагают их разнообразие. Поэтому **недопустима публикация двух статей одного автора в одном номере журнала.** То же правило распространяется и на соседние номера. Так мы поддерживаем разнообразие тем и авторов, исключая превращение журнала в издание, где постоянно публикуется десяток одних и тех же авторов. Исключение составляют статьи вне научных разделов, а также статьи, продолжающиеся из номера в номер. В качестве альтернативы публикации в нашем журнале мы можем предложить автору опубликоваться в другом журнале, с которым у нас заключен договор по обмену статьями.

Очередь. Сроки публикации зависят от количества (и качества) статей, предложенных редакции. Если статей много, они публикуются в порядке очередности, однако редакция оставляет за собой право печатать вне очереди те из них, которые считает наиболее значимыми.

Автор должен также подписать согласие на использование редакцией журнала "Известия УГГУ" его персональных данных.

Известия Уральского государственного горного университета. 2019, вып. 3(55)
News of the Ural State Mining University. 2019, issue 3(55)

На обложке: фото дмиштейнбергита – минерал, алюмосиликат кальция, гексагональный аналог анортита, триморфен с анортитом и святославитом.
On the cover: the photo of dmishteinbergite – mineral, calcium aluminosilicate, hexagonal analog of anorthite, trimorphic with anorthite and svyatoslavite.

Редакция выражает благодарность за помощь в работе журнала

Баранникову Александру Григорьевичу – д-ру геол.-минерал. наук, профессору (Екатеринбург, Россия);
Боярских Геннадию Алексеевичу – д-ру техн. наук, профессору (Екатеринбург, Россия);
Карстен Луизе – Dr. rer. nat. (Ганновер, Германия);
Кожушко Герману Георгиевичу – д-ру техн. наук, профессору (Екатеринбург, Россия);
Козину Владимиру Зиновьевичу - д-ру техн. наук, профессору (Екатеринбург, Россия);
Корнилкову Сергею Викторовичу – д-ру техн. наук, профессору (Екатеринбург, Россия);
Сурневу Виктору Борисовичу – д-ру физ.-мат. наук, профессору (Екатеринбург, Россия);
Филиппову Сергею – Dr. rer. nat. (Ганновер, Германия);
Хальфину Марату Нурмухамедовичу – д-ру техн. наук, профессору (Новочеркасск, Россия)

Редакция
Главный редактор Косарев Н. П.
Заместитель главного редактора Шорин А. Г.
Ответственный секретарь Георгиева Н. В.
Редактор Фишман Ю. П.
Переводчик Алферова А. М.

Верстка Шориной Э. В., Георгиевой Н. В.
Корректура, оформление рисунков Пихтовниковой О. Г.
Идея обложки Васфиловой И. С.

Подписано в печать 13.09.2019. Дата выхода в свет – 23.09.2019.
Формат 60 × 84/8. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 21,27. Тираж 120 экз. Заказ № 20
Цена свободная

Почтовый адрес издателя и учредителя: 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30,
ФГБОУ ВО "Уральский государственный горный университет"
Редакция: 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30, к. 3142
Тел.: (343)283-05-60
E-mail: iuggu-journal@yandex.ru
https://iuggu.ru

Отпечатано в типографии "Для Вас":
620073, г. Екатеринбург, ул. Розы Люксембург, д. 52а, оф. 3