

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 4 (72)

2023

Уральский государственный
горный университет

Известия Уральского государственного
горного университета
2023, вып. 4 (72)

Ural State
Mining University

News of the Ural State
Mining University
2023, issue 4 (72)



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 «УП УРАЛ-ПРЕСС»
«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)

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

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

Ученый секретарь

ЕРОХИН Ю. В. – канд. геол.-минерал. наук, Институт геологии и геохимии им. А. Н. Заварицкого УрО РАН, Россия

Редакционная коллегия

МАКАРОВ А. Б. – д-р геол.-минерал. наук, проф., Уральский государственный горный университет
АБАТУРОВА И. В. – д-р геол.-минерал. наук, проф., Уральский государственный горный университет
ВАЛИЕВ Н. Г. – д-р техн. наук, проф., Уральский государственный горный университет
ГОЛИК В. И. – д-р техн. наук, проф., Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет)
ГОРДЕЕВ В. А. – д-р техн. наук, проф., Кубанский государственный технологический университет
ГРЕВЦЕВ Н. В. – д-р геол.-минерал. наук, проф., Уральский государственный горный университет
ГУМАН О. М. – д-р геол.-минерал. наук, проф., член Российской Академии Естествознания
ДАВЫДОВ В. А. – д-р геол.-минерал. наук, проф., Институт геофизики им. Ю. П. Булашевича УрО РАН
ДАШКО Р. Э. – д-р геолого-минералогических наук, проф., Санкт-Петербургский горный университет
ДУШИН В. А. – д-р геол.-минерал. наук, проф., Уральский государственный горный университет
ЖАБКО А. В. – д-р техн. наук, проф., Уральский государственный горный университет
ЗОТОВ А. Н. – д-р техн. наук, проф., Уфимский государственный нефтяной технический университет
ИВАНОВ К. С. – д-р геол.-минерал. наук, проф., Институт геологии и геохимии им. акад. А. Н. Заварицкого УрО РАН
ИГОЛКИНА Г. В. – д-р геол.-минерал. наук, проф., Институт геофизики им. Ю. П. Булашевича УрО РАН
КОЗЛОВ П. С. – д-р геол.-минерал. наук, проф., Институт геологии и геохимии им. акад. А. Н. Заварицкого УрО РАН
МАЛИЧ К. Н. – д-р геол.-минерал. наук, проф., Институт геологии и геохимии им. акад. А. Н. Заварицкого УрО РАН
МУРЗИН В. В. – д-р геол.-минерал. наук, проф., Институт геологии и геохимии им. акад. А. Н. Заварицкого УрО РАН
НАУМОВ В. А. – д-р геол.-минерал. наук, проф., Институт геологии и геохимии им. акад. А. Н. Заварицкого УрО РАН
ПАНЯК С. Г. – д-р геол.-минерал. наук, проф., Уральский государственный горный университет
ПЕТРОВ Г. А. – д-р геол.-минерал. наук, проф., Институт геологии и геохимии им. акад. А. Н. Заварицкого УрО РАН
ПИСЕЦКИЙ В. Б. – д-р геол.-минерал. наук, проф., Уральский государственный горный университет
ПУЧКОВ В. Н. – д-р геол.-минерал. наук, проф., Институт геологии и геохимии им. акад. А. Н. Заварицкого УрО РАН
СУНГАТУЛЛИН Р. Х. – д-р геол.-минерал. наук, проф., Казанский (Приволжский) федеральный университет
ТАГИЛЬЦЕВ С. Н. – д-р геол.-минерал. наук, проф., Уральский государственный горный университет
ТАЛАЛАЙ А. Г. – д-р геол.-минерал. наук, проф., Уральский государственный горный университет
ХОМЕНКО В. П. – д-р геол.-минерал. наук, проф., Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет
ЩАПОВ В. А. – д-р геол.-минерал. наук, проф., Институт геофизики им. Ю. П. Булашевича УрО РАН
АМДУР А. М. – д-р техн. наук, проф., Уральский государственный горный университет
АПАКАШЕВ Р. А. – д-р хим. наук, проф., Уральский государственный горный университет
БОЯРСКИХ Г. А. – д-р техн. наук, проф., Уральский государственный горный университет
ЗРАЙЦЕВ Д. В. – д-р физ.-мат. наук, проф., Уральский государственный горный университет
КРАСИКОВ С. А. – д-р хим. наук, проф., Уральский государственный горный университет
СИМИСИНОВ Д. И. – д-р техн. наук, проф., Уральский государственный горный университет
ПОТАПОВ В. Я. – д-р техн. наук, проф., Уральский государственный горный университет
ХАЗИН М. Л. – д-р техн. наук, проф., Уральский государственный горный университет
ИГНАТЬЕВА М. Н. – д-р экон. наук, проф., Уральский государственный горный университет
ГЛАЗЫРИНА И. П. – д-р экон. наук, канд. физ.-мат. наук, проф., Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН
ДОРОШЕНКО Ю. А. – д-р экон. наук, проф., Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова
ДУШИН А. В. – д-р экон. наук, проф., Уральский государственный горный университет
ЛАРИЧКИН Ф. Д. – д-р экон. наук, проф., Институт экономических проблем им. Г. П. Лузина ФИЦ КНЦ РАН
НАЗАРОВА З. М. – д-р экон. наук, проф., Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе

Члены международной редколлегии

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

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

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

Academic Secretary

Yu. V. EROKHIN, PhD (*Ekaterinburg, Russia, Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry*)

Editorial board

- A. B. MAKAROV**, Dr, Prof., Ural State Mining University
I. V. ABATUROVA, Dr, Prof., Ural State Mining University
N. G. VALIEV, Dr, Prof., Ural State Mining University
V. I. GOLIK, Dr, Prof., North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University)
V. A. GORDEEV, Dr, Prof., Kuban State Technological University
N. V. GREVTSEV, Dr, Prof., Ural State Mining University
O. M. GUMAN, Dr, Prof., member of Russian Academy of Natural Sciences
V. A. DAVYDOV, Dr, Prof., Bulashevich Institute of Geophysics of the Ural Branch of RAS
R. E. DASHKO, Dr, Prof., Saint Petersburg Mining University
V. A. DUSHUN, Dr, Prof., Ural State Mining University
A. V. ZHABKO, Dr, Prof., Ural State Mining University
A. N. ZOTOV, Dr, Prof., Ufa State Petroleum Technological University
K. S. IVANOV, Dr, Prof., The Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of RAS
G. V. IGOLKINA, Dr, Prof., Bulashevich Institute of Geophysics of the Ural Branch of RAS
P. S. KOZLOV, Dr, Prof., The Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of RAS
K. N. MALICH, Dr, Prof., The Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of RAS
V. V. MURZIN, Dr, Prof., The Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of RAS
V. A. NAUMOV, Dr, Prof., The Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of RAS
S. G. PANYAK, Dr, Prof., Ural State Mining University
G. A. PETROV, Dr, Prof., The Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of RAS
V. B. PISETSKIY, Dr, Prof., Ural State Mining University
V. N. PUCHKOV, Dr, Prof., The Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of RAS
R. Kh. SUNGATULLIN, Dr, Prof., Kazan (Volga region) Federal University
S. N. TAGIL'TSEV, Dr, Prof., Ural State Mining University
A. G. TALALAY, Dr, Prof., Ural State Mining University
V. P. KHOMENKO, Dr, Prof., Moscow State University of Civil Engineering
V. A. SHCHAPOV, Dr, Prof., Bulashevich Institute of Geophysics of the Ural Branch of RAS
A. M. AMDUR, Dr, Prof., Ural State Mining University
R. A. APAKASHEV, Dr, Prof., Ural State Mining University
G. A. BOYARSKIKH, Dr, Prof., Ural State Mining University
D. V. ZAITSEV, Dr, Prof., Ural State Mining University
S. A. KRASIKOV, Dr, Prof., Ural State Mining University
D. I. SIMISINOV, Dr, Prof., Ural State Mining University
V. Ya. POTAPOV, Dr, Prof., Ural State Mining University
M. L. KHAZIN, Dr, Prof., Ural State Mining University
M. N. IGNAT'EVA, Dr, Prof., Ural State Mining University
I. P. GLAZYRINA, Dr, Prof., Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology of the Siberian Branch of RAS
Yu. A. DOROSHENKO, Dr, Prof., Belgorod Shukhov State Technological University
A. V. DUSHIN, Dr, Prof., Ural State Mining University
F. D. LARICHKIN, Dr, Prof., Luzin Institute for Economic Studies – Subdivision of the Federal Research Centre “Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences”
Z. M. NAZAROVA, Dr, Prof., Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting

International members

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

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

EARTH SCIENCES

- Микротекстуры зерен кварца в сосновской толще палеогена: значение для реконструкции питающих провинций на востоке Русской плиты**
Н. Хамада, С. О. Зорина,
Н. Мохаммад
(In English)
- Многоступенчатая схема 3D-гравитационной инверсии для максимальной оптимизации модели подземного фундамента в бассейне Гебель-эль-Зейт, юго-западная часть Суэцкого залива, Египет**
А. Г. М. Хассан, К. С. И. Фараг,
А. А. Ф. Ареф, А. Л. Пискарев
(In English)
- Ксенотим-(Y) из гранитных пегматитов копи «Монацитовая», Адуйский массив, Средний Урал (химический состав и возраст)**
В. В. Хиллер, Ю. В. Ерохин
(In English)
- Пентландит и продукты его изменения в серпентинитах Иткульского гипербазитового массива (Южный Урал)**
А. Е. Богомолова
(In English)
- Закономерности распределения содержаний золота и серебра в рудных телах Березовского месторождения (Средний Урал)**
Г. П. Дворник
- Геохимическая характеристика пород и изотопное датирование циркона из дайки андезитов рудянской толщи (D₂rd) Восточной зоны Среднего Урала**
В. С. Червяковский, Е. А. Слободчиков,
М. В. Червяковская, Н. Н. Фаррахова,
Е. Н. Волчек
- Особенности электропроводности при высоких температурах труднообогатимых титаномагнетитовых руд из Гусевогорского месторождения**
В. В. Бахтерев
- Разработка метода выявления трещин в горных породах криолитозоны на основе дифференцирования данных георадиолокации**
К. О. Соколов
- Лабораторные исследования и анализ математических моделей деформирования раздробленных соляных пород**
М. А. Карасев, А. А. Селихов, А. К. Бычин
- 7 **Quartz Grain Microtextures in the Paleogene Sosnov Formation: Implications for Sediment Provenance in the Eastern Russian Platform**
N. Hamada, S. O. Zorina,
N. Mohammad
(In English)
- 19 **Multi-stage 3D Gravity Inversion Scheme for Maximum Optimization of the Subsurface Basement Model at Gebel El-Zeit Basin, Southwestern Gulf-of-Suez, Egypt**
A. G. M. Hassan, K. S. I. Farag,
A. A. F. Aref, A. L. Piskarev
(In English)
- 40 **Xenotime-(Y) from granitic pegmatites of the Monatsitovaya mine, Aduisky massif, Middle Urals (chemical composition and age)**
V. V. Khiller, Yu. V. Erokhin
(In English)
- 49 **Pentlandite and its alteration products in serpentinites of the Itkul'sky ultrabasic massif (Southern Urals)**
A. E. Bogomolova
(In English)
- 55 **Conformities distribution contents gold and silver in ore bodies of the Berezovskoe deposit (Middle Urals)**
G. P. Dvornik
- 69 **Geochemical characteristic of rocks and isotope dating of zircon from the andesite dyke of the rudyanskaya sequence (D₂rd) of the Middle Urals Eastern zone**
V. S. Chervyakovskiy, E. A. Slobodchikov,
M. V. Chervyakovskaya, N. N. Farrakhova,
E. N. Volchek
- 81 **Features of electrical conductivity at high temperatures of complex titanomagnetite ores from the Gusevogorsky deposit**
V. V. Bakhterev
- 87 **Development of a method for identifying cracks in permafrost rocks based on differentiation of GPR data**
K. O. Sokolov
- 94 **Laboratory tests and analysis of mathematical models of deformation of crushed salt rocks**
M. A. Karasev, A. A. Selikhov, A. K. Bychin

- О гидротермальной природе кремней в отложениях артинского яруса Предураля**
А. В. Кузин, Е. Ю. Лобанов 106 **On the hydrothermal nature of cherts in the Artinskian stage deposits of the Cis-Urals**
A. V. Kuzin, E. Yu. Lobanov
- Воздействие предприятий горно-металлургического комплекса Свердловской области на окружающую среду и направления его снижения**
И. В. Медведева, Е. В. Амирова, Г. А. Студенок, Е. М. Цейтлин, О. М. Медведева 116 **Impact of enterprises of the mining and metallurgical complex of the Sverdlovsk region on the environment and directions of its reduction**
I. V. Medvedeva, E. V. Amirova, G. A. Studenok, E. M. Tseitlin, O. M. Medvedeva
- Сейсмические события Свердловской области за период 1788–2022 гг.**
А. Ю. Осипова, В. Ю. Осипов, Г. И. Парыгин 127 **Seismic events in the Sverdlovsk region for the period 1788–2022**
A. Yu. Osipova, V. Yu. Osipov, G. I. Parygin

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

ECONOMIC SCIENCES

- Проблемы, осложняющие введение в хозяйственный оборот техногенных месторождений**
М. Н. Игнатьева, В. Е. Стровский, О. А. Логвиненко, О. Г. Комарова
(In English) 137 **Problems complicating the introduction of technogenic deposits into economic circulation**
M. N. Ignat'eva, V. E. Strovskiy, O. A. Logvinenko, O. G. Komarova
(In English)
- Международный опыт институционального обеспечения геологического изучения и использования недр**
С. М. Сальманов 146 **International experience in institutional support for geological study and use of subsoil**
S. M. Sal'manov
- Текущие изменения и стратегические направления модернизации нефтесервисного рынка**
Т. А. Белошицкий, В. В. Бирюкова 154 **Current changes and strategical directions of modernization of oilfield services market**
T. A. Beloshitskiy, V. V. Biryukova

ДИСКУССИОННЫЙ КЛУБ

DISCUSSION CLUB

- Анализ грозовой активности на территории Ирака и Турции**
И. А. Аль-Хулайфави, А. Р. Иошпа 164 **Analysis of Thunderstorm Activity in Iraq and Turkey**
I. A. Al-Khulaifawi, A. R. Ioshpa

ИСТОРИЯ ГОРНОГО ДЕЛА

HISTORY OF MINING

- Федор Иванович Рукавишников (1902–1942) и бывший рукавишниковит (ныне терсенит)**
Ю. А. Поленов, С. И. Шевелева 170 **Fedor Ivanovich Rukavishnikov (1902–1942) and former rukavishnikovite (now ternesite)**
Yu. A. Polenov, S. I. Sheveleva
- Иван Герман – подданный двух империй**
В. В. Филатов 181 **Ivan Herman – citizen of two empires**
V. V. Filatov

Науки о Земле Earth sciences

UDC 552.513.1

<http://doi.org/10.21440/2307-2091-2023-4-7-18>

Quartz Grain Microtextures in the Paleogene Sosnov Formation: Implications for Sediment Provenance in the Eastern Russian Platform

Nadia HAMADA^{1,2}
Svetlana Olegovna ZORINA^{1**}
Nosheen MOHAMMAD^{1,2***}

¹Kazan (Volga region) Federal University, Kazan, Republic of Tatarstan, Russia

²Damascus University, Damascus, Syria

Abstract

The purpose of the research. The chief task of the research is to examine the microtextures of quartz grains in the Paleogene Sosnov Formation, which is a sedimentary unit located in the Ulyanovsk-Syzran Volga Region of the Russian Platform. By examining the microtextures, which include mechanical, chemical and mechanical/chemical features, it becomes possible to find out the mechanisms by which grains were transported and subsequently modified.

The relevance of the research. The relevance of this research lies in the fact that the analysis of quartz grain microtextures provides valuable insights into sediment provenance of sedimentary deposits is crucial for reconstructing past geological environments and unraveling depositional histories.

Research methodology. Twenty quartz grains were collected from sands of the Paleogene Sosnovka Formation, exposed by the Eastern-Tashlinsky and the Kuchurovsky quarries to a depth of 5 and 7.5 m, respectively. The research methodology involved scanning electron microscopy (SEM) to investigate the microtextures of quartz grains.

Results and conclusions. The study reveals 19 microtextures types, which were categorized into mechanical, chemical, and combined mechanical/chemical microtextures. An analysis of SEM indicated that chemical microtextures are present in the Paleogene Sosnov Formation, which made it possible to suggest that the sands passed through a low-energy phase during their transition. The data obtained enables us to reconstruct the diverse depositional paleoenvironments, including eolian, subaqueous, mixed subaqueous-eolian, and pedological settings.

Keywords: Microtextures, Scanning electron microscopy, Quartz, Sosnov Formation, Paleogene, Russian Platform.

Introduction

Understanding the provenance of sedimentary deposits is crucial for reconstructing past geological environments and unraveling depositional histories. In this regard, microtextural analysis of quartz grains using SEM provides a powerful tool for understanding the transport processes and source regions of sediments [1, 2]. By examining the microtextures, which include mechanical and chemical features, it becomes possible to find out the mechanisms by which grains were transported and subsequently modified. This study focuses on the microtextures of quartz grains in the Paleogene Sosnov Formation, aiming to interpret the sediment provenance and transport dynamics in the Ulyanovsk–Syzran Volga Region (USVR) of the Eastern Russian Platform.

This study is an extension of the previous research by Zorina and coauthors [3], that examined the surface microtextures of quartz grains and origin of the Paleogene sands in the USVR. The authors used optical and electron microscopy to analyze the microtextures of the quartz grains to identify the paleoconditions of their formation. They found that the quartz grains from the Paleogene sands had different degrees of rounding and polishing, indicating different transport and depositional processes. The authors concluded that the Paleogene sands provide evidence of diverse depositional paleoconditions, including eolian, subaquatic (beach zone), subaquatic-eolian (coastal dunes), injective, and continental pedological settings. Which were derived

✉ nadia.m.hamada@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0002-5634-5695>

** svzorina@yandex.ru

 <http://orcid.org/0000-0001-6315-1672>

*** nosheen.g.mohammad@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0002-3893-041X>

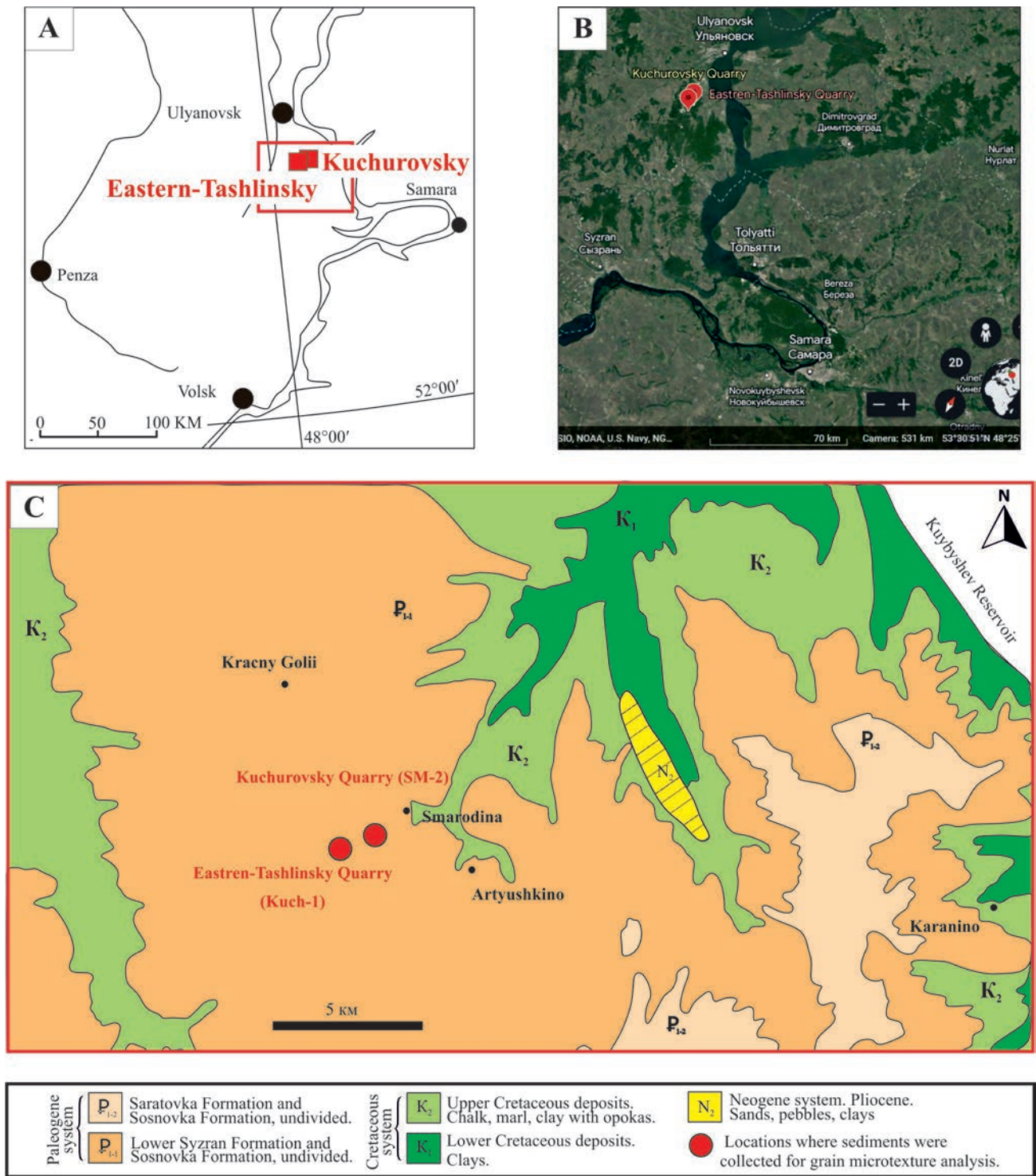


Figure 1. Location of the Eastern Tashlinsky and Kuchurovsky Quarries on a geographical map A, Google map B, geological map of the southeast the Ulyanovsk region (according to Lichman, 1989 with changes and additions) C
 Рисунок 1. Расположение Восточно-Ташлинского и Кучуровского карьеров на географической карте A, карте Google B, геологической карте юго-востока Ульяновской области (по Личману, 1989 г. с изменениями и дополнениями) C

from diverse depositional environments, including eolian, subaqueous, mixed subaqueous-eolian, and pedological settings.

This study supports the previous results also and delves into a more meticulous investigation, based on the surface microtextural analysis of a larger number of quartz grains through the utilization of scanning electron microscopy (SEM). This

technique, renowned for its capacity to scrutinize and elucidate the intricate minutiae and attributes of quartz grain surfaces with unparalleled precision, furnishes a formidable tool for characterization and examination.

Geological setting

The present investigation focuses on quartz sands from the Sosnov Formation of the Paleogene, which are exposed in

Table 1. Distribution of quartz grains occurring with specific microtextures in samples SM-2 and Kuch-1 of the Paleogene Sosnov Formation of the USVR (• – present)

Таблица 1. Распределение зерен кварца, встречающихся со специфической микротекстурой в образцах СМ-2 и Куч-1 палеогеновой сосновской свиты УСВР (• – настоящее время)

Types of microtextures		Locations of the studied quartz grain		
		Kuchurovsky sand quarry	Tashlinsky sand quarry	
		Samples		
		SM-2	Kuch-1	
Mechanical	Outline	1. Subrounded	•	
		2. Rounded	•	•
		3. Well-Rounded		•
		4. Conchoidal fractures	•	•
		5. Arcuate steps		•
		6. Straight steps		•
		7. Meandering ridges		•
		8. V-shaped percussion cracks	•	
		9. Crescentic percussion marks	•	•
		10. Bulbous edges	•	•
		11. Oriented etch pits	•	•
Chemical		12. Solution pits	•	
		13. Solution crevasses		•
		14. Silica globule and flowers	•	•
		15. Low relief	•	•
Mechanical and chemical		16. Medium relief	•	•
		17. Elongated depressions	•	•
		18. Chattermarks	•	
		19. Cracks		•

the Kuchurovsky and Eastren-Tashlinsky Quarries located in the USVR of the Russian Platform (Fig. 1, A, B, C).

The Sosnov Formation, with a thickness of up to 180 meters, is widespread in the USVR and consists of white, brownish, and pinkish-white fine-grained quartz sands with sporadic nodular interbeds of sandstones on siliceous cement. The sand deposits are underlain and overlain by lower Cretaceous Maastrichtian chalk, but in some areas, they are predominantly underlain and overlain by Paleocene Lower Syzran opokas and diatomites [4, 5].

Research materials and methods

Two bulk samples (Sm-2, Kuch-1) were collected from sands of the Paleogene Sosnov Formation of the USVR. Sand sample Sm-2 was collected from the Kuchurovsky and Kuch-1 was taken from the Tashlinsky quarries. The whole number of quartz grains is 20, 10 grains of each sample. The samples were prepared with meticulous, ensuring the preservation of the original surface features. The quartz grains are carefully mounted onto SEM stubs, followed by polishing and carbon coating to minimize charging effects and enhance conductivity. This preparatory stage plays a crucial role in achieving high-resolution imaging and accurate chemical and mechanical analysis, providing a solid foundation for interpretations. Then, samples were examined under a Zeiss LSM 780 visible light confocal laser scanning microscope (Kazan Federal University). The acquired images were then processed using specialized software (CorelDRAW 2018) to measure the di-

mensions of specific microtextures of individual grains. Based on Vos [6], surface microtextures of quartz grains are interpreted and analyzed.

Results

Quartz grains microtextures of both samples (Sm-2) and (Kuch-1) are distinguished generally by rounded quartz grains with low relief, bulbous edges and elongated depressions. Other features such as meandering ridges, crescentic percussion marks, v-shaped percussion cracks and chattermarks are also frequently observed. Solution-related features including solution pits and crevasses are more pronounced in Kuch-1 grains (Table 1).

The microtextures mentioned above reveal 19 types of microtextures which can be subdivided into three categories based on their mode of origin: mechanical, chemical and mechanical/chemical.

1. Mechanical microtextures

The characterization of surface microtextures of quartz grains is crucial for comprehending their geological behavior. Mechanical microtextures, such as roundness, provide essential insights into the processes of grain transportation, abrasion, and weathering. *Roundness* is a measure of the degree of sphericity or angularity of a particle, reflecting its resistance to abrasion and transport. The SEM analysis revealed the roundness values for the examined quartz grains. Most quartz grains of both samples (Sm-2) and (Kuch-1) exhibited a near-perfect spherical shape (Plate 1, A, E, F; 3, C, 4, A), while others dis-

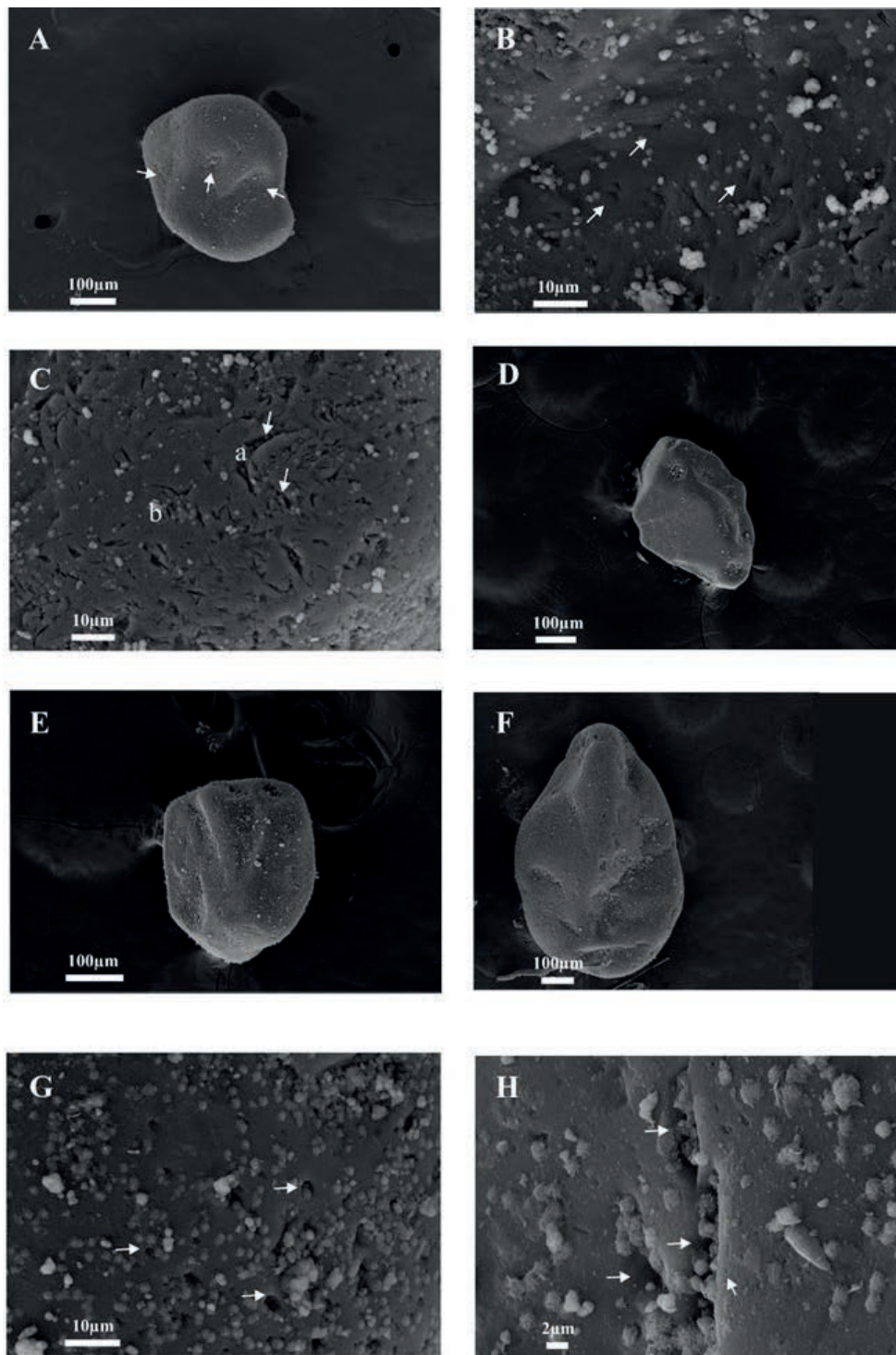


Plate 1. Micrographs of quartz grains of SM-2: A – Rounded grain with low relief and bulbous edges. On the grain can be observed depressions with dimension 40–104 µm (arrows); B – Detail of oriented triangular etch pits (2 µm) on the old conchoidal fracture plane; C – Crescentic percussion marks (a) and chattermarks (b) widened by solution. Note their irregular orientation and variation in size (2–18 µm). Numerous scattering silica flowers (B, C) on the surface and within crescentic percussion marks (arrows in C); D – Subrounded grain with low to medium relief and smoothy edges. Note on the grain elongated (60–120 µm) and circular (50 µm in diameter) depressions; E – Rounded grain with low relief. On the grain, 3 elongated depressions (0.1 mm) can be observed; F – Rounded grain with low relief and bulbous edges. Note many depressions (80–210 µm) on the grain; G – Circular solution pits (1–3 µm in diameter) on a fracture plane. Some of pits are filled with silica flowers particles (arrows). Note silica flowers on the plane formed by merging silica globules due to continued precipitation; H – Elongated solution pits on a fracture plane (arrows)

Фотопластинка 1. Микрофотографии зерен кварца SM-2: А – округлое зерно с низким рельефом и выпуклыми краями. На зерне наблюдаются углубления размером 40–104 мкм (стрелки); В – чертёж ориентированных треугольных ямок травления (2 мкм) на старой плоскости раковистого излома; С – серповидные следы от перкуссии (а) и от трещин (b), расширенные раствором. Обратите внимание на их неправильную ориентацию и изменение размера (2–18 мкм). Многочисленные разбросанные цветки кремнезема (В, С) на поверхности и в серповидных следах от перкуссии (стрелки в С); D – полукруглое зерно с рельефом от низкого до среднего и гладкими краями. Обратите внимание на удлиненные (60–120 мкм) и круглые (диаметром 50 мкм) углубления в зернах; E – округлое зерно с низким рельефом. На зерне наблюдаются 3 удлиненных углубления (0,1 мм); F – округлое зерно с низким рельефом и выпуклыми краями. Обратите внимание на многочисленные углубления (80–210 мкм) на зерне; G – круглые ямки раствора (диаметром 1–3 мкм) на плоскости излома. Некоторые ямки заполнены частицами цветков кремнезема (стрелки). Обратите внимание на цветы кремнезема на плоскости, образовавшиеся в результате слияния глобул кремнезема в результате продолжающегося осаждения; H – удлиненные ямки раствора на плоскости излома (стрелки)

played varying degrees of spherical (subrounded, plate 1, D; 2, A, E) and well rounded (Plate 3, A, B). The obtained results indicated that the roundness of quartz grains is influenced by factors such as transport distance, depositional environment, and post-depositional processes. The occurrence of rounded grains often indicates their involvement in eolian phases.

Among mechanical microtextures of the sands Paleogene Sosnovka Formation, another diagnostic indicator for eolian transportation is the occurrence of bulbous edges [6–8]. *Bulbous edges* have the shape of a parabolic curve and appear together with elongated depressions (Plate 1, A, F; 3, C). Eolian processes involve the transportation of sediment particles by wind, and during the eolian phase, grains repeatedly bounce and collide with each other and the substrate. These repeated impacts result in the abrasion and rounding of particle edges, leading to the characteristic roundness and bulbous edges observed in these grains.

Furthermore, the presence of conchoidal fractures is observed in both studied samples. *Conchoidal fractures* are characterized by smooth, curved surfaces resembling the interior of a seashell or a broken glass (Plate 1, B; 2, A, B; 3, D; 4, B). These fractures are common in quartz grains and primarily formed through a process called conchoidal fracturing. When subjected to stress, quartz grains exhibit a unique behavior known as brittle failure, where the grains break along planes of weakness rather than undergoing plastic deformation. It could happen with arcuate and straight steps (Plate 3, B). The high-energy impact or rapid release of stress during fracturing creates shockwaves that propagate through the grain, resulting in the formation of conchoidal fractures. These fractures can indicate the occurrence of high-energy events, such as rapid sediment transport, impact processes, or post-depositional tectonic activities.

The grains from both samples exhibit numerous oriented and not oriented crescentic percussion marks (Plate 1, C; 2, D; 3, A, B). *Crescentic percussion marks* are curved or arc-shaped features that form on the surface of quartz grains. They resemble crescent moons or horseshoes and vary in size (2–18 μm) in the studied grains. These marks can indicate past impact events, such as particle collisions or high-energy sedimentary processes involving grain-to-grain interactions and pointed of eolian transportation phase during the sedimentary history of the grain. Also, can note that some marks are widened by solution processes (Plate 1, C).

In sample Knch-1 exhibited meandering ridges (Plate 3, F; 4, B). *Meandering ridges* are elongated, sinuous features that traverse the surface of quartz grains. They appear as raised or elevated structures with a winding or serpentine pattern. These ridges are commonly observed on the surfaces of grains that have been subjected to transport processes, such as fluvial or aeolian transport.

V-shaped percussion cracks showed in sample Knch-1 (Plate 2, C, F). Those cracks are small, linear features that form at the impact points on the surface of quartz grains. They resemble V-shaped notches or fractures and are commonly observed on grains that have undergone mechanical impact or post-depositional alteration. These cracks can indicate past impact events, such as high-energy transport or sedimentary processes involving particle random collisions.

2. Chemical microtextures

Silica globules and flowers covered most of the older fracture planes of grains in the sample (SM-2) and less in the sample (Kuch-1). First, silica globules are formed when stationary grains find themselves embraced by silica-laden fluids that overflow with saturation [9]. Then, during continuing silica precipitation, silica globules mixed to form silica flowers (Plate 1, G; 2, C; 4, F). Thus, their genesis requires relatively low-energetic environments such as continental, pedological, and diagenetic settings [9].

The abnormal meandering surface topography of quartz grains in sample Kuch-1 related to solution processes, solution pits and crevasses, while those processes are a less influence on the quartz surface of SM-2 grains sample (Plate 3, E; 4, A). Elongated and semi-regular circular solution pits (1–3 μm in diameter) are reported in SM-2 grains sample on a fracture plane (Plate 1, G, H). The formation of solution pits is a result of the dissolution of specific crystallographic planes on the quartz surface, influenced by factors such as pH, temperature, and solution composition. Another feature caused by dissolution is the crevasses of the solution. A deep crack on the surface of Kuch-1 is observed, 1mm long and 3 μm wide. Their occurrence is associated with chemical dissolution activity (Plate 4, C).

Oriented etch pits occur on quartz grains of both samples as extremely regular, triangular depressions on an old fracture plane (Plate 1, B; 4, D). These etch pits, which are formed by selectively dissolving the quartz surface in a suitable etchant, provide valuable information about the crystallographic orientation and texture of quartz grains. Once in sample Kuch-1, oriented etch pits exhibit distinct morphological features that reflect the underlying crystal lattice orientation. We measured the apical and basal angle of one angle of triangular etch pits (74 to 81°, respectively), (Plate 4, E).

3. Mechanical/chemical microtextures

Nearly all grains (SM-2, Kuch-1) exhibit *low to medium reliefs*, resulting from either a lack or a modest presence of topographic irregularities (Plate 1, A, D, E, F; 2, E; 3, A, B, C, E; 4, A). The genesis of these reliefs emerges from encounters, marked by collisions, with adjoining grains or through transformative processes. The relief of the grains can be further diminished through the artistry of solution and precipitation processes. These mechanisms fill the depressions and dissolve the ridges, skillfully molding the grain's relief.

Elongated depressions more manifest in sample (SM-2) as vast, bowl-shaped concavities upon quartz grain's surface with dimension reaches a range of 40 to 210 μm (Plate 1, A, D, E, F; 2, A; 3, C). The dimension of elongated depressions is inversely proportional to the size of the quartz grains [10]. The genesis of these features is attributed to the active eolian transport, characterized by direct collisions amidst saltating or creeping grains [7].

Noted in sample (SM-2) scarcely scattered shallowly indented *chattermarks* occur with random orientations and some of those are widened by solution (Plate 1, C; 2, F). Chattermarks are not characteristic of a certain sedimentary environment.

Discussion

The SEM analysis of quartz grain microtextures in the Paleogene Sosnov Formation revealed a variety of features that

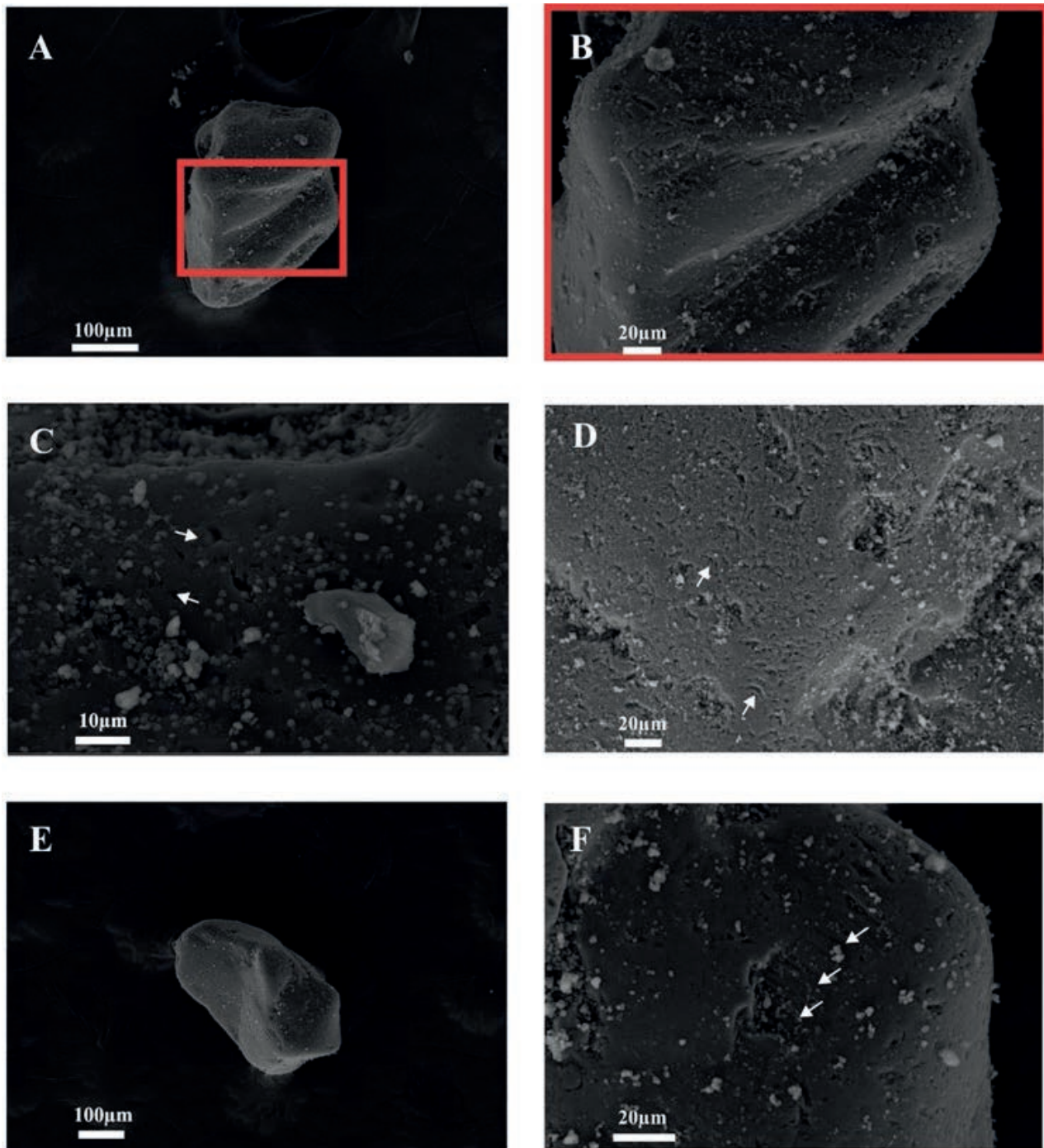


Plate 2. Micrographs of quartz grains of SM-2: A – Subrounded quartz grain. Elongated depressions can be observed on an old conchoidal fracture; B – Closer view of image (A); C – Old fracture plane with V-shaped percussion cracks. The plane is covered with globules and flowers silica; D – Numerous crescentic percussion marks presence, pointing of eolian transportation phase during the sedimentary history of the grain; E – Subrounded quartz grain with low relief; F – Old fracture plane with V-shaped percussion cracks, triangular etching pattern and shallowly indented chattermarks (arrows)

Фотопластинка 2. Микрофотографии зерен кварца SM-2: А – округленное зерно кварца. На старом раковистом изломе можно наблюдать удлиненные впадины; В – изображение поближе (А); С – старая плоскость излома с V-образными трещинами от перкуссии. Плоскость покрыта глобулами и цветками кремнезёма; D – наличие многочисленных серповидных следов от перкуссии, указывающих на эоловую фазу преобразования в осадочной истории зерна; E – полукруглое зерно кварца с невысоким рельефом; F – старая плоскость излома с V-образными трещинами от перкуссии, треугольным рисунком травления и неглубокими трещинами (стрелки)

can be used to infer the sediment provenance and transport processes in the USVR. The observed microtextures can be classified into three main types: mechanical, chemical and mechanical/chemical according to Gillott [7]. The mechanical microtextures include meandering ridges, bulbous edges and percussion cracks, which are formed by grain-to-grain collisions

and friction during transport. The chemical microtextures include pits, silica globules and flowers, which are formed by dissolution and precipitation processes in pedogenic or diagenetic environments. The mechanical/chemical microtextures include relief and elongated depressions, which are formed by a combination of abrasion and silica precipitation [6].

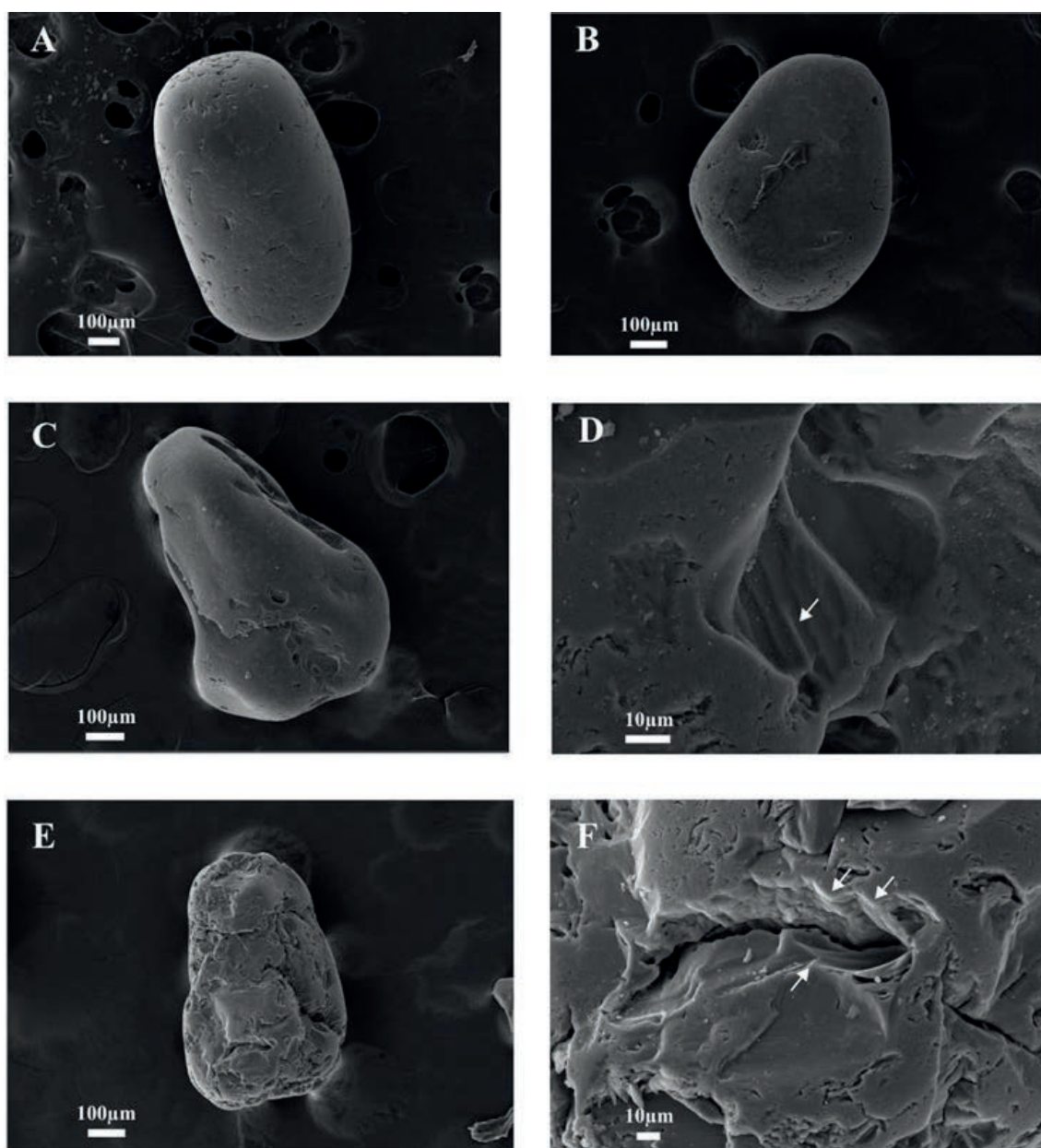


Plate 3. Micrographs of quartz grains of Kuch-1: A, B – Well-rounded quartz grain with low relief. Note unoriented crescentic percussion marks on the grains; C – Rounded grain with low relief and bulbous edges. Elongated depressions 0.2 mm on the right side of the grain; D – Surface showing conchoidal fracture plane with straight steps (arrows). The space between the successive steps of about 2.5 μm; E – Rounded grain with low to medium relief and clear aspects of arcs, grooves and scratches. Solution and precipitation both affected the grain surface; F – Meandering ridges (arrows), pointing of eolian transportation phase in desert and littoral dunes during the sedimentary history of the grain

Фотопластинка 3. Микрофотографии зерен кварца Куч-1: A, B – зерно кварца хорошо округлой формы с невысоким рельефом. Обратите внимание на неориентированные серповидные следы от перкуссии на зернах; C – округлое зерно с низким рельефом и выпуклыми краями. Удлиненные углубления 0,2 мм с правой стороны зерна; D – поверхность, показывающая раковинистую плоскость излома с прямыми ступенями (стрелки). Пространство между последовательными ступенями около 2,5 мкм; E – округлое зерно с рельефом от низкого до среднего и четкими дугами, канавками и царапинами. Раствор и осаждение повлияли на поверхность зерна; F – извилистые хребты (стрелки), указывающие на золовую фазу преобразования в пустынях и прибрежных дюнах в течение осадочной истории зерна

The manifestation and frequency of these microtextures can signify diverse depositional environments, such as eolian, subaqueous (beach zone), mixed subaqueous-eolian (coastal dunes) [6, 9, 11, 12]. For instance, meandering ridges are regarded as prevailing in eolian environments within deserts and littoral dunes, where grains endure repetitive cycles of abrasion and silica cementation [13, 14]. V-shaped percussion cracks are engendered in highly energetic subaqueous environments with substantial grain-to-grain interaction, such as the littoral

zone (beach zone). Crescentic percussion marks are distinctive for eolian environments, where grains collide at shallow angles. The presence of bulbous edges is also linked to eolian transportation, wherein grains acquire rounded forms due to abrasion and silica precipitation. The formation of solution pits and solution crevasses is associated with diagenetic processes in relatively low-energy environments, such as continental or soils [7, 13]. Silica globules and flowers arise in relatively low-energy settings,

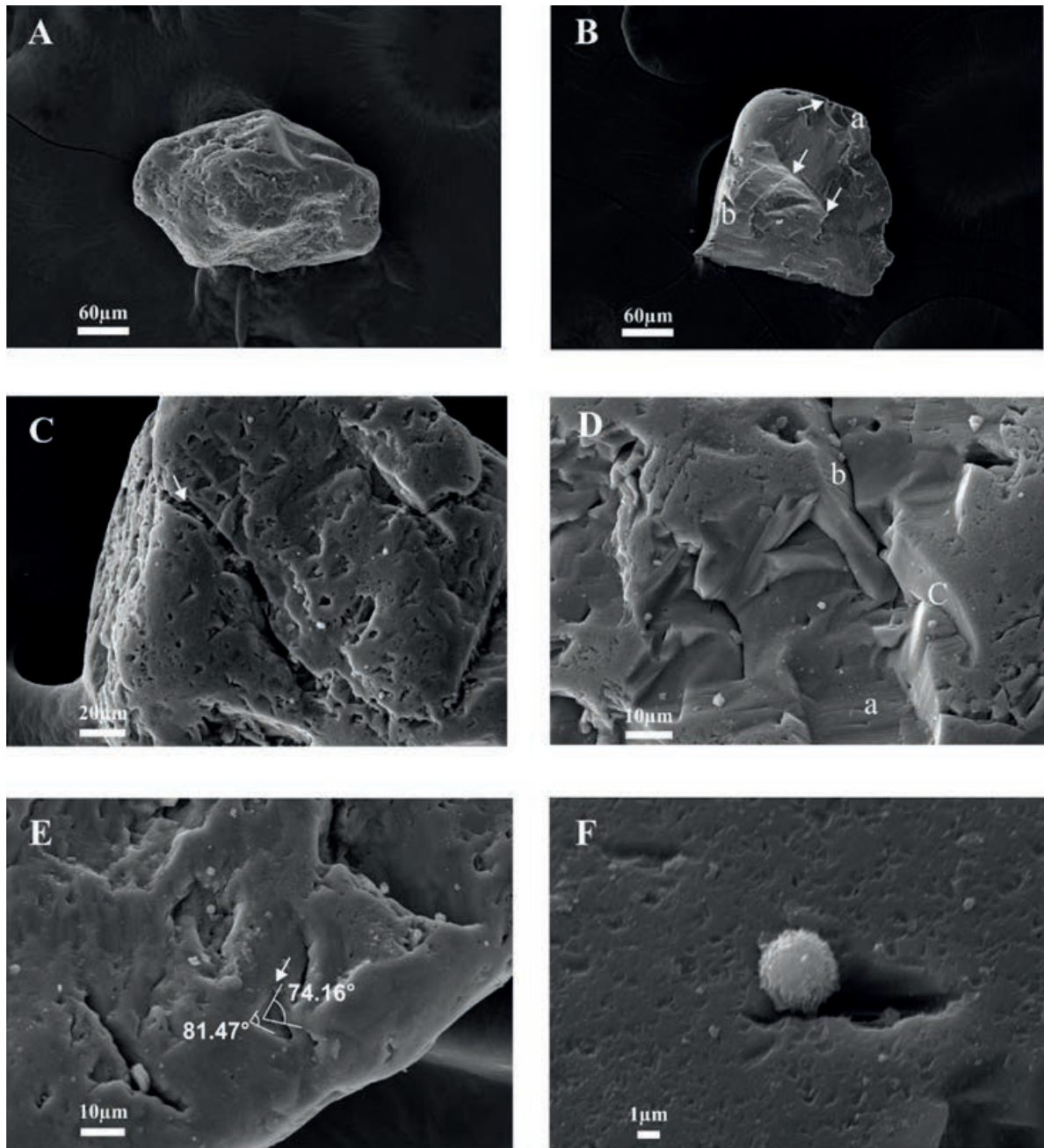


Plate 4. Micrographs of quartz grains of Kuch-1: A – Rounded grain with low relief. The grain surface affected by solution and precipitation; B – A broken part of rounded grain. Note meandering ridges (arrows) and conchoidal fracture planes with arcuate (a) and straight (b) steps; C – Surface showing numerous oriented triangular etch pits. Note a deep crack on the surface (arrow), 1 mm long and 3 μm wide, which indicates the intensity of chemical activity; D – Detail of triangular etch pits (2 μm). The crystallographic control on the orientation of the extremely regular etch triangles is clearly expressed by the presence of this microtexture on three different crystal planes (a, b, c); E – Detail of triangular etch pits. Note their extremely regular outline and crystallographic orientation (arrow). The apical and basal angle size of triangular etch pit (74 to 81°, respectively); F – Silica flowers (1.5–2 μm) on an old fracture plane

Фотопластинка 4. Микрофотографии зерен кварца Куч-1: A – округлое зерно с невысоким рельефом. Поверхность зерна, подверженная воздействию раствора и осадков; B – отломанная часть округлого зерна. Обратите внимание на извилистые гребни (стрелки) и раковистые плоскости излома с дугообразными (a) и прямыми (b) ступенями; C – поверхность с многочисленными ориентированными треугольными ямками травления. Обратите внимание на глубокую трещину на поверхности (стрелка) длиной 1 мм и шириной 3 мкм, что указывает на интенсивность химической активности; D – чертёж ямок травления треугольной формы (2 мкм). Кристаллографический контроль ориентации чрезвычайно правильных треугольников травления ясно выражен в присутствии этой микротекстуры на трех разных кристаллических плоскостях (a, b, c); E – чертёж треугольных ямок травления. Обратите внимание на их чрезвычайно правильный контур и кристаллографическую ориентацию (стрелка). Размер апикального и базального углов ямки травления треугольной формы (от 74 до 81° соответственно); F – цветки кремнезема (1,5–2 мкм) на старой плоскости излома

such as continental, pedological, and diagenetic domains [9]. Elongated depressions are attributed to high-energy eolian transport, where direct collisions between saltating or creep-

ing grains frequently transpire, often accompanied by bulbous edges, and are frequently smoothed-over by silica precipitation amidst upturned plates. Rounded grains are often linked to eo-

lian phases, where grains undergo prolonged abrasion, leading to the loss of their angularity [7, 13]. Low relief is predominantly instigated by grain collisions and/or alteration processes, where the grain's relief is ultimately reduced by solution and precipitation mechanisms, which fill depressions and dissolve protrusions [6].

Based on these criteria, the quartz grains from the Sosnov Formation show evidence of multiple transport phases and mixed provenance sources. The presence of meandering ridges, crescentic percussion marks, bulbous edges, elongated depressions and rounded grains suggests a significant eolian phase in the sedimentary history of the formation. The presence of solution pits, silica globules and flowers indicate that some of the quartz grains were also transported in relatively low-energy environments with dissolutional pedological horizons. The fact of the continental pedological conditions, prevailing during the formation of Sosnov sandstones, has already been in agreement with Zorina et al. [15]. V-shaped percussion cracks reported in Kuchurovsky quarry are evidence of subaqueous environments (beach zone), where some of the quartz grains were transported in relatively high-energy environments. These processes could have occurred either before or after the eolian phase, depending on the local tectonic and climatic conditions. For example, some of the quartz grains could have been reworked by fluvial systems from older eolian deposits or exposed bedrock, or some of the eolian sediments could have been deposited in lacustrine basins or buried and cemented by groundwater. The presence of mechanical/chemical microtextures, such as meandering ridges, bulbous edges and elongated depressions, suggests that abrasion and silica precipitation were active during both eolian and fluvial phases, resulting in complex microtextural patterns on the quartz grains.

The SEM analysis of quartz grain microtextures in the Sosnov Formation provides valuable information on the sediment provenance and transport processes in the USVR during the Paleogene. The microtextures reflect a complex sedimentary history involving multiple phases of eolian, subaqueous (beach zone), mixed subaqueous-eolian (coastal dunes) and

continental pedological settings. The microtextures can be used to discriminate between different depositional environments and to infer the paleoclimatic and paleogeographic conditions of the region.

Conclusions

In conclusion, the SEM analysis of quartz grain microtextures in the Paleogene Sosnov Formation has provided valuable insights into sediment provenance and transport processes in the USVR. The classification of microtextures into mechanical, chemical, and mechanical/chemical types has enabled the identification of diverse depositional paleoenvironments, including eolian, subaqueous, mixed subaqueous-eolian, and pedological settings.

A significant eolian phase is reported in the formation of sedimentary history, consistent with the region of paleogeographic reconstruction during the Paleogene. This eolian phase prevailed by high energy due to predominance of subrounded to well-rounded with bulbous edges.

Quartz grains from the Paleogene Sosnov Formation have significant proportions of solution pits, silica globules and flowers indicate transport in relatively low-energy environments. These processes may have occurred before or after the eolian phase, depending on local tectonic and climatic conditions.

The presence of mechanical/chemical microtextures further indicates the influence of both abrasion and silica precipitation during eolian, subaqueous, mixed subaqueous-eolian, and pedological phases, resulting in complex microtextural patterns on the quartz grains.

Overall, the SEM analysis of quartz grain microtextures provides valuable information for discriminating between different depositional environments, inferring the paleoclimatic conditions and reconstructing paleoenvironments of the USVR during the Paleogene.

Acknowledgements

The research is supported by the grant of the Russian Science Foundation (project no. 22-27-00070, <https://rscf.ru/en/project/22-27-00070>).

REFERENCES

1. Krinsley D. H. and Marshall J. R., 1987, Krinsley D. H., Marshall J. R. 1987, Sand grain textural analysis: an assessment. *Clastic particles: Scanning Electron Microscopy and Shape Analysis of Sedimentary and Volcanic Clasts*. N. Y.: Van Nostrand-Reinhold, pp. 2–15.
2. Mahaney W. C., Stewart A., Kalm V. 2001, Quantification of SEM microtextures useful in sedimentary environmental discrimination. *Boreas*, no. 30(2), pp. 165–171.
3. Zorina S. O., Nikashin K. I., Afanasieva N. I., Hamada N. 2023, Surface microtextures of quartz grains and origin of the Paleogene sands in the Ulyanovsk–Syzran Volga region. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki* [Proceedings of Kazan University. Natural Sciences Series], vol. 165, no. 2, pp. 295–307. (In Russ.) <http://doi.org/10.26907/2542-064X.2023.2.295-307>
4. Zhukova G. A., Turova A. V., Karimova Kh. Kh. et al. 2013, State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1 : 200,000. Srednevolzhskaya series. Sheet N-38-XVIII (Maina). An explanatory note. Moscow, 151 p. (In Russ.) URL: <http://geo.mfvsegei.ru/200k/n-38/n-38-18/index.html>
5. Zhukova G. A., Turova A. V., Karimova Kh. Kh. et al. 2013, State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1 : 200,000. Srednevolzhskaya series. Sheet N-39-XVIII (Maina). An explanatory note. Moscow, 151 p. (In Russ.)
6. Vos K., Vandenberghen N., Elsen J. 2014, Surface textural analysis of quartz grains by scanning electron microscopy (SEM): from sample preparation to environmental interpretation. *Earth-Science Reviews*, vol. 128, pp. 93–104. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.10.013>
7. Mahaney W. C. 2002, Atlas of sand grain surface textures and applications. Oxford: Oxford University Press, 237 p.
8. Costa P. J. M., Andrade C., Mahaney W. C., Marques da Silva F., Freire P., Freitas M. C., Janardo C., Oliveira M. A., Silva T., Lopes V., 2013. Aeolian microtextures in silica spheres induced in a wind tunnel experiment: comparison with aeolian quartz. *Geomorphology*, vol. 180–181, pp. 120–129. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.09.011>
9. Higgs R. 1979, Quartz-grain surface features of Mesozoic–Cenozoic sands from the Labrador and western Greenland continental margins. *J. Sediment. Petrol.*, vol. 49, no. 2, pp. 599–610. <https://doi.org/10.1306/212F779D-2B24-11D7-8648000102C1865D>
10. Krinsley D. H., Friend P. F., Klimentidis R. 1976, Eolian transport textures on the surfaces of sand grains of Early Triassic age. *Geological Society of America Bulletin*, vol. 87(1), pp. 130–132.

11. Krinsley D. H., Donahue J. 1968, Environmental interpretation of sand grain surface textures by electron microscopy. *Geological Society of America Bulletin*, vol. 79, no. 6, pp. 743–748. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1968\)79\[743:EIOSGS\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1968)79[743:EIOSGS]2.0.CO;2)
12. Margolis S. V., Krinsley D. H. 1974, Processes of formation and environmental occurrence of microfeatures on detrital quartz grains. *American Journal of Science*, vol. 274, pp. 449–464. <https://doi.org/10.2475/ajs.274.5.449>
13. Krinsley D. H., Doornkamp J. C. 1973, Atlas of quartz sand surface textures. Cambridge: Cambridge University Press, 102 p.
14. Le Ribault L. 1977, L'exoscopie des quartz. Paris: Masson, 160 p.
15. Zorina S. O., Afanasieva N. I., Hamada N., Nikashin K. I., Sokerin M. Yu. 2023, Paleogene quartz sandstones of the Sosnovka Formation of the Uljanovsk–Syzran Volga region (Eastern Russian Platform): Mineral composition and origin. *Izvestiya Saratovskogo universiteta. Nauki o Zemle* [Izvestiya of Saratov University. Earth Sciences], vol. 23, issue 1, pp. 21–30 (*In Russ.*). <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2023-23-1-21-30>

The article was received on September 29, 2023

Микротекстуры зерен кварца в сосновской толще палеогена: значение для реконструкции питающих провинций на востоке Русской плиты

Надия ХАМАДА^{1,2*}

Светлана Олеговна ЗОРИНА^{1**}

Ношин МОХАММАД^{1,2***}

¹Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Республика Татарстан, Россия

²Дамасский университет, Дамаск, Сирия

Аннотация

Цель исследования. Основная задача данного исследования — изучение микротекстуры зерен кварца палеогеновой сосновской свиты — группы осадочных пород, расположенной в регионе Ульяновско-Сызранского Поволжья на Русской плите. При изучении микротекстуры, включающей в себя механические, химические и механохимические особенности, становится возможным выяснить механизмы, с помощью которых зерна преобразовывались и впоследствии модифицировались.

Актуальность. Актуальность данного исследования объясняется тем, что анализ микротекстуры кварцевых зерен дает ценную информацию о происхождении осадочных отложений, что имеет решающее значение для реконструкции прошлой геологической среды и раскрытия истории отложений.

Методы исследования. Двадцать зерен кварца отобраны из песков палеогеновой сосновской свиты, на Восточно-Ташлинском и Кучуровском карьерах на глубине 5 и 7,5 м соответственно. Методика исследования заключалась в использовании сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) для исследования микротекстуры зерен кварца.

Результаты и выводы. В результате исследования выявлено 19 типов микротекстур, которые были разделены на механические, химические и комбинированные механохимические микротекстуры. Анализ СЭМ показал наличие в палеогеновой сосновской свите химических микротекстур, что позволило предположить, что пески при преобразовании прошли через низкоэнергетическую фазу. Полученные данные позволяют реконструировать разнообразные осадконакопительные палеообстановки, в том числе эоловые, субаквальные, смешанные субаквально-эоловые и педологические.

Ключевые слова: микротекстуры, сканирующая электронная микроскопия, кварц, сосновская свита, палеоген, Русская плита.

Исследование поддержано грантом Российского научного фонда (проект № 22-27-00070, <https://rscf.ru/project/22-27-00070>).

ЛИТЕРАТУРА

1. Krinsley D. H., Marshall J. R. Sand grain textural analysis: an assessment // *Clastic particles: Scanning Electron Microscopy and Shape Analysis of Sedimentary and Volcanic Clasts*. N. Y.: Van Nostrand-Reinhold, 1987. P. 2–15.
2. Mahaney W. C., Stewart A., Kalm V. Quantification of SEM microtextures useful in sedimentary environmental discrimination // *Boreas*. 2001. No. 30(2). P. 165–171.
3. Зорина С. О., Никашин К. И., Афанасьева Н. И., Хамада Н. Микротекстуры поверхности зерен кварца и происхождение палеогеновых песков Ульяновско-Сызранского Поволжья // *Записки Казанского университета*. 2023. Вып. 165. № 2. С. 295–307. <http://doi.org/10.26907/2542-064X.2023.2.295-307>
4. Жукова Г. А., Турова А. В., Каримова Х. Х. [и др.]. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1: 200 000. Средневолжская серия. Лист Н-38-ХVIII (Майна). Пояснительная записка. М., 2013. 151 с. URL: <http://geo.mfvsegei.ru/200k/n-38/n-38-18/index.html>
5. Жукова Г. А., Турова А. В., Каримова Х. Х. [и др.]. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1: 200 000. Средневолжская серия. Лист Н-39-ХVIII (Майна). Пояснительная записка. М., 2013. 151 с.
6. Vos K., Vandenberghe N., Elsen J. Surface textural analysis of quartz grains by scanning electron microscopy (SEM): from sample preparation to environmental interpretation // *Earth-Science Reviews*. 2014. Vol. 128. P. 93–104. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.10.013>

✉ nadia.m.hamada@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0002-5634-5695>

** svzorina@yandex.ru

 <http://orcid.org/0000-0001-6315-1672>

*** nosheen.g.mohammad@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0002-3893-041X>

7. Mahaney W. C. Atlas of sand grain surface textures and applications. Oxford: Oxford University Press, 2002. 237 p.
8. Costa P. J. M., Andrade C., Mahaney W. C., Marques da Silva F., Freire P., Freitas M. C., Janardo C., Oliviera M. A., Silva T., Lopes V., Aeolian microtextures in silica spheres induced in a wind tunnel experiment: comparison with aeolian quartz // *Geomorphology*. 2013. Vol. 180–181. P. 120–129. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.09.011>
9. Higgs R. Quartz-grain surface features of Mesozoic–Cenozoic sands from the Labrador and western Greenland continental margins // *J. Sediment. Petrol.* 1979. Vol. 49. No. 2. P. 599–610. <https://doi.org/10.1306/212F779D-2B24-11D7-8648000102C1865D>
10. Krinsley D. H., Friend P. F., Klimentidis R. 1976, Eolian transport textures on the surfaces of sand grains of Early Triassic age. *Geological Society of America Bulletin*, vol. 87(1), pp. 130–132.
11. Krinsley D. H., Donahue J. Environmental interpretation of sand grain surface textures by electron microscopy // *Geological Society of America Bulletin*. 1968. Vol. 79. No. 6. P. 743–748. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1968\)79\[743:EIOSGS\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1968)79[743:EIOSGS]2.0.CO;2)
12. Margolis S. V., Krinsley D. H. Processes of formation and environmental occurrence of microfeatures on detrital quartz grains // *American Journal of Science*. 1974. Vol. 274. P. 449–464. <https://doi.org/10.2475/ajs.274.5.449>
13. Krinsley D. H., Doornkamp J. C. Atlas of quartz sand surface textures. Cambridge: Cambridge University Press, 1973. 102 p.
14. Le Ribault L. L'exoscopie des quartz. Paris: Masson, 1977. 160 p.
15. Зорина С. О., Афанасьева Н. И., Хамада Н., Никашин К. И., Сокерин М. Ю. Палеогеновые кварцевые песчаники сосновской свиты Ульяновско-Сызранского Поволжья (Восточная Русская плита): минеральный состав и происхождение // *Известия Саратовского университета. Науки о Земле*. 2023. Т. 23. Вып. 1. С. 21–30. <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2023-23-1-21-30>

Статья поступила в редакцию 29 сентября 2023 года

Multi-stage 3D Gravity Inversion Scheme for Maximum Optimization of the Subsurface Basement Model at Gebel El-Zeit Basin, Southwestern Gulf-of-Suez, Egypt

Ahmed Gamal Mohamed HASSAN^{1,2*}

Karam Samir Ibrahim FARAG³

Alaa Ahmed Fahmi AREF²

Alexey Lazarevich PISKAREV¹

¹Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

²Nuclear Materials Authority (NMA), Cairo, Egypt

³Ain shams University, Cairo, Egypt

Abstract

Relevance and purpose of the work. Due to its basement fault block pattern in the sedimentary basin, the Southwestern Gulf of Suez's Gebel El-Zeit basin is one of Egypt's most desirable hydrocarbon concessions. However, salt diapirs in sedimentary layers have hindered seismic interpretations in this area, making it challenging to build a 3D central primary basinal structure. This study uses Bouguer gravity anomalies to input basement complex lateral density model assumptions to determine the optimal three-dimensional basement depth for the study area.

Research methodology. Based on the concept of sequential 3D spectral layered-earth inversion approaches, through trials with the Oldenburg and other forward models, many forward optimization strategies and parameterization sequences with variable constraint parameter assumptions were used to regulate the inversion operations within a proposed three-stage gravity inversion scheme to identify the optimal depth-density solution with a minimal computational data misfit. This study statistically analyzes the basement's relief and complicated lateral density distribution to determine the best parameters for a 3D depth-density model solution. Zero regional gravity offset and DC-shift, which forced the mean error to be zero, helped simulate the lateral density model's best-possible constraining assumptions.

Results and conclusions. Correlating depth data from many stratigraphical-control wells drilled in the inverted 3D basement model confirmed the basement relief optimality of the study area. Correlation analysis showed a good match between the predicted and measured depths, proving the resulting optimality of the basement complex's lateral density distribution, minimizing the computational depth error to a minimal percentage.

Keywords: Egypt, Gulf of Suez, El Zeit Basin Area, Bouguer anomalies, spectral layered gravity inversion scheme, parameterizations and optimization.

Introduction

Gravitational anomalies inversely help in recovering sedimentary basins, tectonics, and petroleum-rich places. Given the source's depth, thickness, and shape, determining the basement's undulating surface morphology from gravity measurements is a nonlinear inverse problem. Different source assumptions may create discrepancies when determining sedimentary basin basement depth. The forward Fast Fourier Transform (FFT) method estimates undulating layer gravitational or magnetic influences [1, 2].

The slab formula ($g = 2\pi\gamma\Delta\rho t$) predicts sediment thickness at each gravity datum utilizing just the gravitational constant (g), density contrast ($\Delta\rho$), and slab thickness (t). Iterative modeling shows nonlinearity [3]. Later articles modified the technique by increasing iterations, converting to a density-depth function instead of a constant density, and re-evaluating the fitting function.

The Bott's iterative procedure's step sizes was adjusted based on the model's ratio of observed to estimated gravity

anomalies [4]. Silva suggested testing the model if the $L2$ norm of the residual vector is lower than in the previous iteration to speed convergence [3]. The density matched the gravity model (drill hole gravity data, gamma-gamma density, and saturated or unsaturated sample density measurements). Linear, quadratic, exponential, hyperbolic, and parabolic models reveal that density growth is most significant towards the surface [5–8]. The environment affects sediment density.

Density data may not match the density contrast function from density measurements at a few basin locations, making depth-dependent density contrast challenging to establish [8]. Gravity modeling in sedimentary basins may benefit from non-density contrast interpretation methods.

Backward computing on the model's iteration field yields the analytic solution for the gravity field of a two-dimensional polygonal body, a three-dimensional rectangular prism, or a complex undulating layer [3]. Fourier-domain operations are faster than space-domain operations, as Bott's technique

*ahmed.gamal_88@hotmail.com

avoids matrix multiplications and inversions. Formulas for polyhedral bodies with a linear density contrast function, analytical formulas for prismatic bodies with a parabolic [9] or cubic polynomial [10] function, and algorithms for modeling the vertical variation of density contrast with depth all require an exponential or cubic polynomial fitting function [6, 11, 12]. Jachens calculated the basement's growing density's gravitational impact and created measures to minimize it using Bott's approach [13]. Phelps examined Nevada's Yucca Flat basin isostatic anomalies [8].

Tikhonov's regularized inversion estimates basement geometry for interpreting gravity data [14]. Inverting subsurface columns into prisms with known horizontal dimensions and densities predicts column thicknesses. The L_2 norm of the discrete first-order derivative of the model's objective function helps regularize the solution. Martins used

the L_1 norm of the discrete derivative total variation function to avoid penalizing quick morphological changes during basement depth inversion [15]. Sun employed nonlinear inversion to restore smoothness and blockness to the model [16]. Two early inversions split the research area into smooth- and blocky-density contrast zones. The last inversion reduces the L_p model norm.

Feng established a nonlinear inverse approach that minimizes an objective function by adjusting model smoothness in the target area using a composite regularizing function [17]. Edge analysis or first-approximation models identify unique gravity anomalies. Nonlinear modeling estimates basement morphology and constant density contrast [18]. Li and Portniaguine modeled sedimentary basins without basement estimators [19, 20]. Regularized inversion is problematic because objective function stabilizers impact

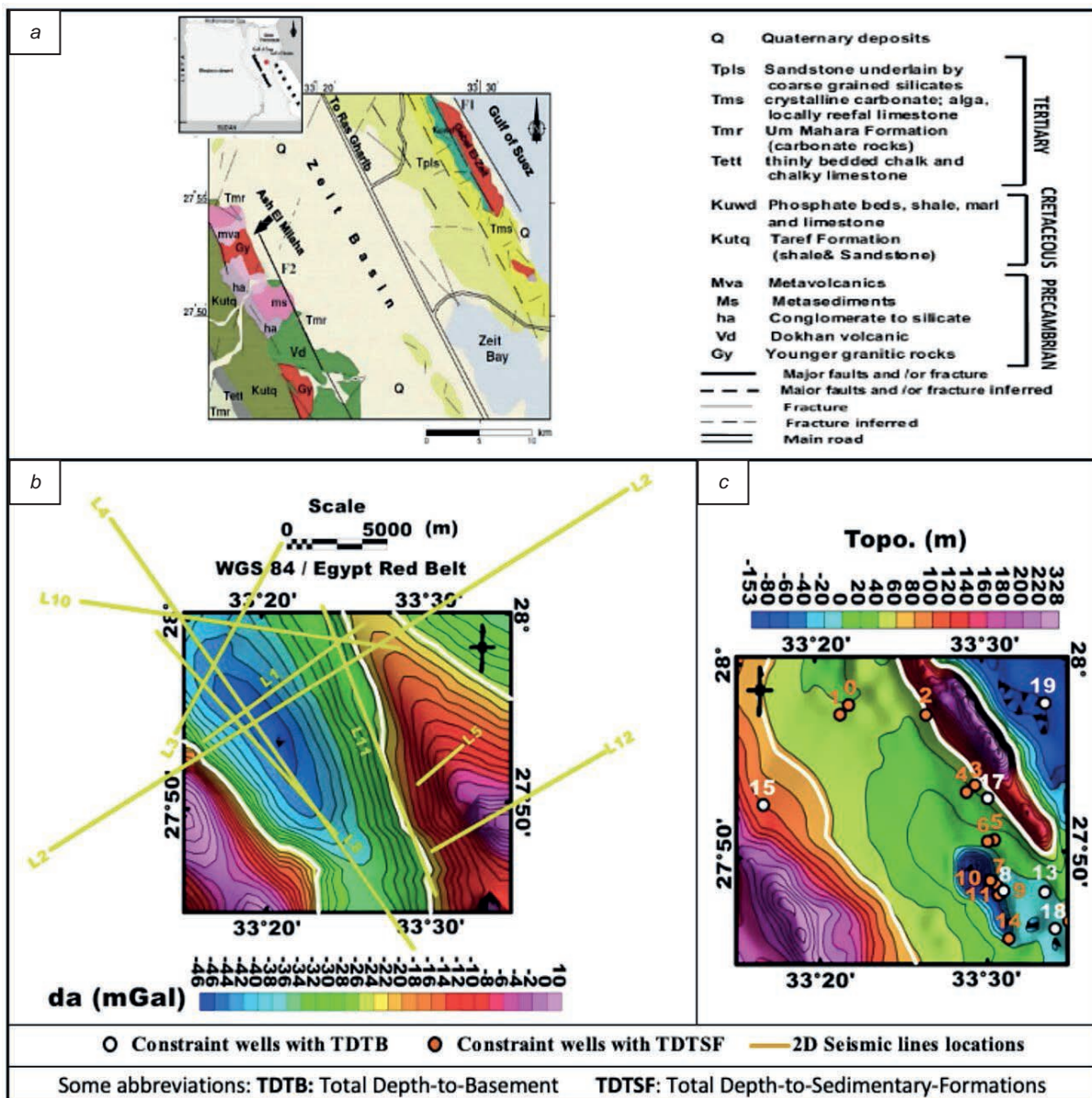


Figure 1.1. Data and geological setting: a – surface geologic map “after [34]”; b – Bouguer gravity anomaly contour map; c – Topographic contour map

Рисунок 1.1. Данные и геологическая обстановка: а – геологическая карта поверхности «по [34]»; б – контурная карта гравитационной аномалии Буге; с – топографическая контурная карта

Table 1. The reachable and unreachable basement constraint wells that we used to constrain and evaluate the optimality of the inverse depth model results of our inversion scheme in the study area [35, 36]

Таблица 1. Достижимые и недостижимые скважины, ограничивающие фундамент, использованные для ограничения и оценки оптимальности результатов модели инверсивной глубины нашей схемы инверсии на исследуемой территории [35, 36]

Well symbol	Well Name	Total Drilled Depth, m	Company	Status
<i>1st group / wells with T.D Reached Rock Unit [Basement] @ geologic age/ Pre-Cambrian</i>				
W8	C9A-1	2577	Conco	Abandoned tested oil and gas
W13	QQ89-11	1129	DEOCO	Abandoned
W15	Wadi Dib #1	3769	CHEV EGY	Abandoned
W17	Gazwarina # 1	2162	Marathon	Suspended oil
W18	QQ89-3	2908	SUCO	Abandoned
W19	ERDMA-2	4051	Published [37]	
<i>2nd group / wells with T.D Reached Rock Unit [Nubia Sandstone (Nu)] @ geologic age / Carboniferous-Jurassic</i>				
W2	Kabrite west-1	1272	Petrozeit	Abandoned oil stain
W3	Gazwarina-2	1272	Marathon	Abandoned oil shows
W5	Gebel El Zeit-west-1	1966	Deminex	Abandoned
W6	Gebel El Zeit-west-2	2195	Deminex	Abandoned
W11	East Ras Gemsa-4	2542	Gupco	Abandoned gas shows
<i>3rd group / wells with T. D Reached Rock Unit [Matulla Formation (Ma)] @ geologic age / Upper Cretaceous</i>				
W9	Khalig El Zeit-1	2509	Devon	Abandoned
W10	East Ras Gemsa-2	2538	Gupco	Abandoned
W16	Zeit Bay 1	4452	CHEV EGY	Abandoned
<i>4th group / wells with T.D Reached Rock Unit [Nukhul Formation(Nuk)] @ geologic age / Lower Miocene</i>				
W0	Gebel El Zeit-2	3743	GPC	Abandoned
<i>5th group / wells with T.D Reached Rock Unit [Rudies Formation (Ru)] @ geologic age / Lower Miocene</i>				
W1	Ramadan-1	3760	GPC	Abandoned oil and gas shows
W4	Gazwarina-3	951	Marathon	Abandoned
W7	C9A-3	2122	Conoco	Abandoned
W14	C9B-1	3183	Conoco	Abandoned

Table 2.1. An explanation of any acronyms that may be used, along with a taxonomy of the different parameters used in our inversion scheme’s parameterization of the forward and inverse models

Таблица 2.1. Объяснение любых сокращений, которые могут использоваться, а также таксономия различных параметров, используемых в параметризации нашей схемы инверсии прямой и инверсной моделей

Type	Parameter	Parameterization meaning
Root-mean-square and coefficient of variance evaluation parameters	$RMSD_{DTB0}$	Root-mean-square deviation of the initial-hypothesized depth-to-basement
	$RMSD_{DTBe}$	Root-mean-square deviation of the inversely estimated recovered depth-to-basement
	$CV - RMSD_{DTB0}$	The initially hypothesized depth-to-basement’s root-mean-square deviation coefficient of variation
	$CV - RMSD_{DTBe}$	The inversely estimated recovered depth-to-basement’s root-mean-square deviation coefficient of variation
	$CV - RMSD_{rD0}$	The initially hypothesized homogenous basement complex’s density’s root-mean-square deviation coefficient of variation
	$CV - RMSD_{rDe}$	The inversely estimated-recovered homogenous basement complex’s density’s root-mean-square deviation coefficient of variation
	$CV - RMSD_{LDDb0}$	The initially hypothesized basement complex’s lateral density distribution’s root-mean-square deviation coefficient of variation
	$CV - RMSD_{LDDbe}$	The inversely estimated recovered basement complex’s lateral density distribution’s root-mean-square deviation coefficient of variation
Depth and density model key parameters	$DTBa$	Depth-to-basement actually measured
	DTB_0	Depth-to-basement initially hypothesized
	$DTBe$	Depth-to-basement inversely estimated
	ρ_{b0}	Basement complex’s initial hypothesized homogenous density
	ρ_{be}	Basement complex’s inverse estimated recovered homogenous density
	$LDDb_0$	Basement complex’s initial hypothesized lateral density distribution
	$LDDbe$	Basement complex’s inverse estimated recovered lateral density distribution

solution fundamental features, regularization parameters, and model parameter restrictions.

Several basement depth measurements geologically confine ITRESC approaches, which approximate density

depth or contrast function. ITRESC will be tested in Egypt’s southwest Gulf of Suez El Zeit basin with results comparison.

A prior information and geological setting. The Gulf of Suez formed when the African and Arabian tectonic plates

Table 2.2. (continued)
Таблица 2.2. (продолжение)

Density contrast model key parameters	$\Delta\rho(b-s)_0$	Sedimentary-Basement's initially-hypothesized homogenous density contrast interface
	$\Delta\rho(b-s)e$	Sedimentary-Basement's inversely-estimated recovered homogenous density contrast interface
	$\Delta\rho(LDDb-s)_0$	Sedimentary-Basement's initially-hypothesized lateral density contrast interface distribution
	$\Delta\rho(LDDb-s)e$	Sedimentary-Basement's inversely-estimated recovered lateral density contrast interface distribution
Inversion process constraint parameters	DC shift	DC shift
	Reg. offset	Regional offset
	Cnv. limit	Convergence limit
	Flt. LHC limit	Lower high cut limit Filter
	Flt. UHC limit	Upper high cut limit Filter
Data and data misfit parameters	da	Bouguer anomalies actual-observed data
	d_0	Bouguer anomalies initially-hypothesized
	de	Bouguer anomalies inversely-estimated
	Δde	Residual bouguer anomalies as an indicator for inversely-estimated recovered data misfit

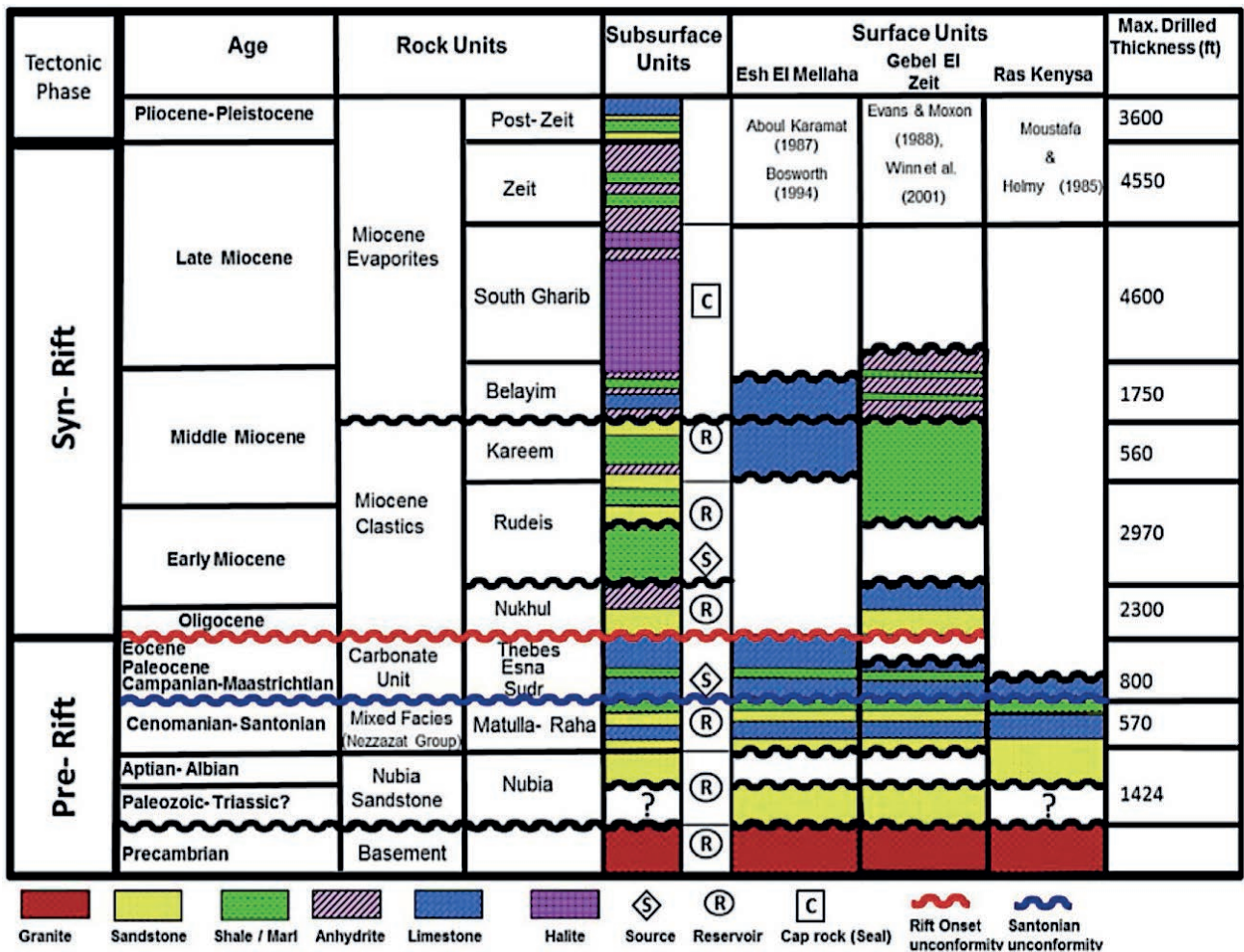


Figure 1.2. Lithostratigraphic geological column of southern Gulf of Suez including the study area of Gebel El Zeit after [33]
Рисунок 1.2. Литостратиграфическая геологическая колонка южной части Суэцкого залива, включая район исследований Гебель-эль-Зейт по [33]

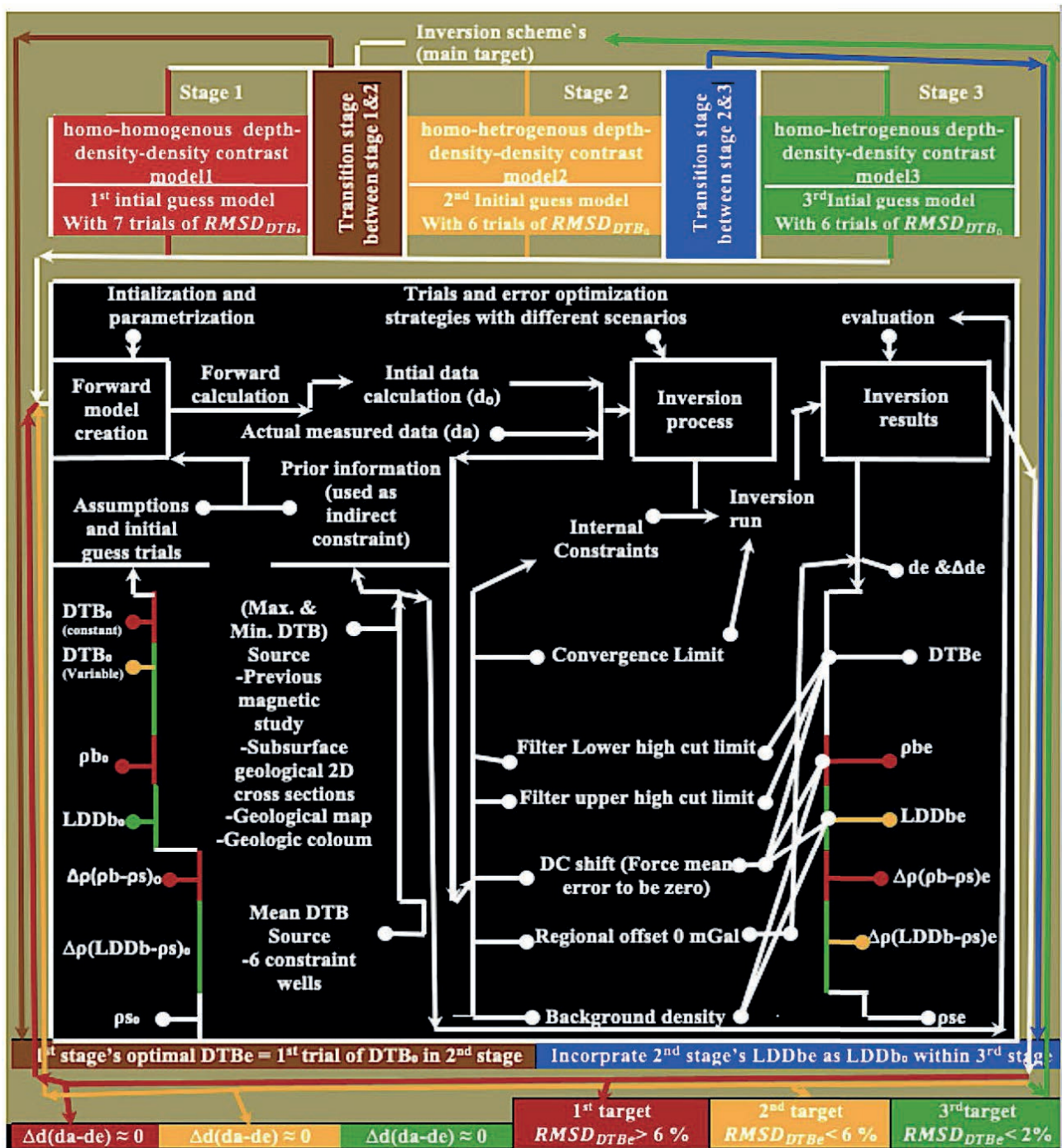


Figure 2.1. The flowchart for the three-stage inversion scheme used in the present research comprises optimization scenarios carried out at each stage and between stages. Tables 2.1 and 2.2 have a thorough list of abbreviations. Legend shown in figure 2.2
 Рисунок 2.1. Блок-схема трехэтапной схемы инверсии, используемой в данном исследовании, включает сценарии оптимизации, выполняемые на каждом этапе и между этапами. В табл. 2.1 и 2.2 приведен подробный список сокращений. Легенда показана на рис. 2.2

diverged in the late Oligocene and early Miocene [21, 22]. Low-angle listric normal faulting and dyke injection created eastward half grabens along the rift's fault blocks [23]. The subsidence moved the rift axis eastward into the asymmetric axial grabens in the middle to late Miocene. During the Pliocene through the Pleistocene/Holocene, the southern Gulf of Suez intra-rift structural block Esh El-Mallaha was faulted and raised [24, 25]. As shown in fig. 1.1, a, Faults F1 and F2 follow the Gulf of Suez and run NW-SE in multiple wadis filled with Quaternary alluvium, juxtaposing Precambrian bedrocks

[26, 27]. Deep tectonic faults give the Gemsa-El Zeit Bay Basin a profound structural complexity. Nubian Sandstone, El Mallaha Formation, Raha Formation, Thebes Formation, Nukhul Formation, Lower/Middle Miocene Rudeis and Kareem layers, Sabkhas, and salt marshes comprise it [25, 28–31].

Metamorphic, granitic, and Dokhan volcanic rocks dominate the study area's eastern and western flanks, Gebels El Zeit and Esh El-Mallaha [32].

Gravimetry can enhance Earth model computations by investigating the potential field without the direct

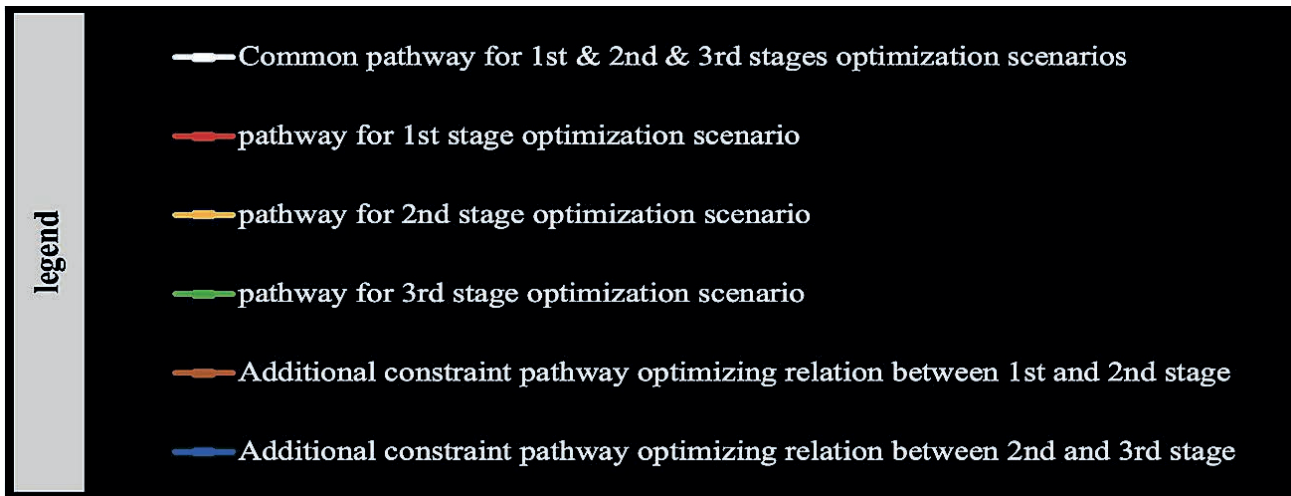


Figure 2.2. The legend for the proposed inversion scheme flow chart shown in figure 2.1
 Рисунок 2.2. Легенда к предлагаемой блок-схеме схемы инверсии, представленной на рис. 2.1

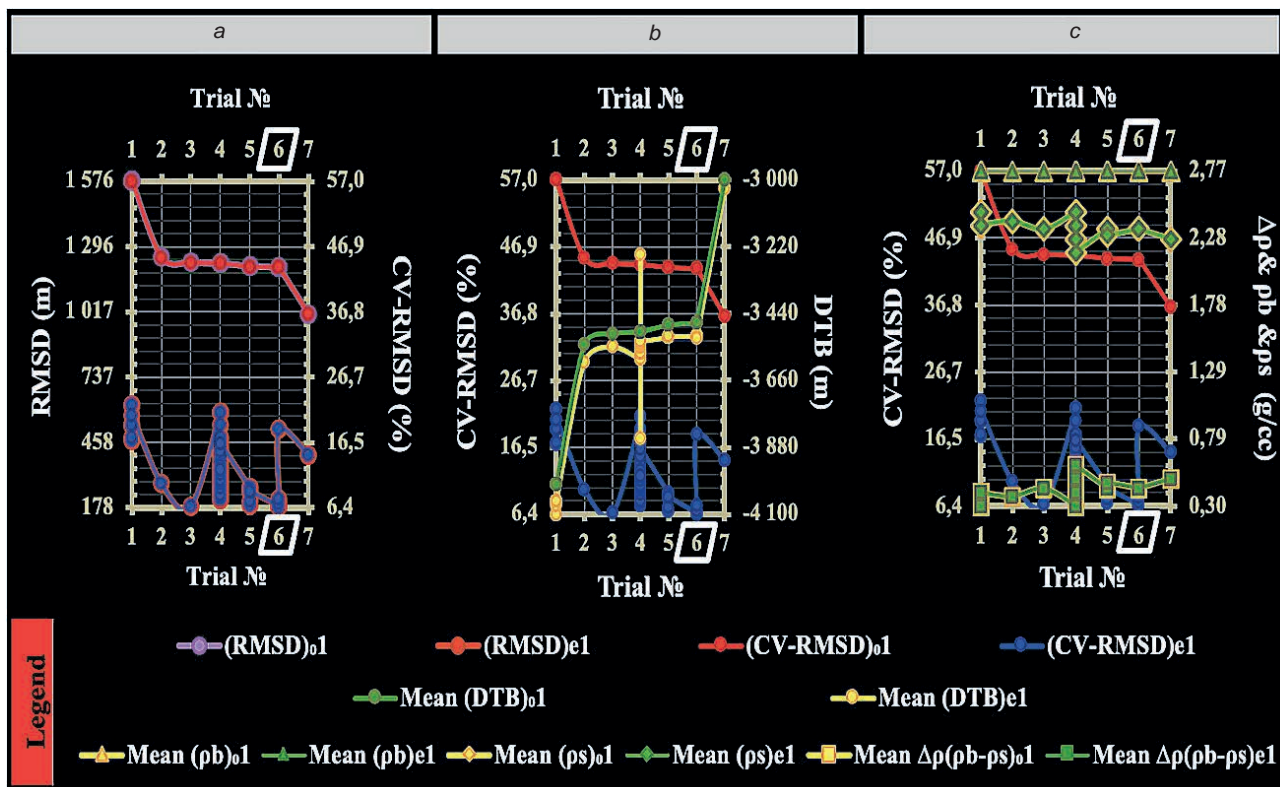


Figure 3. Three interconnected graphs (a–c) represent first-stage data analysis for depth inverse modeling in the inversion scheme. The y-axis in these graphs shows the first stage of initial guesses and inverse estimates of erroneous parameterization for modeling parameters, including basement depth, density, and density contrast. Initial depth error guesses seven trials on the x-axis controlled inverse estimation. The best solution was estimated on the sixth trial, with a 6.43 percent error. Tables 2.1 and 2.2 list abbreviations extensively
 Рисунок 3. Три взаимосвязанных графика (а–с) представляют собой анализ данных первого этапа для глубинного инверсионного моделирования в схеме инверсии. По оси у на этих графиках показан первый этап исходных предположений и обратных оценок ошибочной параметризации параметров моделирования, включая глубину фундамента, плотность и контраст плотности. Начальная погрешность глубины предполагает семь попыток обратной оценки, контролируемой по оси х. Лучшее решение было оценено в шестом испытании с ошибкой 6,43 %. В табл. 2.1 и 2.2 подробно перечислены сокращения

constraint of stratigraphic-control wells. Table 1 lists these wells.

Bouguer gravity data. This study used a 0.01 mGal resolution Lacoste and Worden gravimeter (Scintrex Inc., USA). The Bureau Gravimetric International (BGI) in Paris

authorized the General Petroleum Corporation of Egypt’s (GPC) ten-year (1974–1984) proposal to develop a gravity map of Egypt by establishing a national base net covering the whole country and augmenting all foreign companies’ surveys. The Egyptian Academy of Scientific Research and Technology

supervised it. Remeasurements ensured correctness. Raw data were exported in *x*, *y*, and *z* dimensions, gridding at 1000 m intervals.

The contour map of the research area was colored using Bouguer anomalies (Fig. 1.1, *b*). Remarkable doublet Western gravity highs suggest local transfer faults intersect Gebel Esh El-Mallaha. Gebel El Zeit and Esh El-Mallaha display complicated basement outcrops east and west of Gemsa-El Zeit Bay, with a vast sedimentary basin in the middle as shown in fig. 1.1, *a*, *b*, *c*.

The Litho-stratigraphic geological column of southern Gulf of Suez including the study area of Gebel El Zeit is represented in fig. 1.2 [33].

Inversion Scheme

General Outline. Douglas Oldenburg and others in the three-stage inversion scheme quantified the El-Zeit basin’s geologic attributes. The Oasis Montaj program’s GM-SYS extension sub-routine (Geosoft Inc., Toronto, ON, Canada) uses a popular spectral layered-earth inversion algorithm for data reduction, filtering, and optimization, resulting in the best inversion solution for basement relief delineation. It also determines the appropriate average density for the sedimen-

tary-basement layers, their density difference, depths to the basement, and sedimentary section thickness under the study area. Its inversion results were compared to others to establish if Oldenburg’s constraining parameters produced the best-solved and most reliable model. For time and effort reduction, the proposed inversion scheme employs a basic forward model and six optimization strategies to obtain the optimal initial and inverse models, three from forward modeling and three from inverse modeling. The parameterization flowchart for the proposed scheme’s forward and inverse modeling operations is shown in fig. 2.1 with a legend in fig. 2.2, and all parameterization abbreviations utilized within our research are listed in tables 2.1 and 2.2.

Stages of the Scheme. In the first stage, three optimization strategies have been proposed: one for forward depth modeling that uses the unconstrained initial forward constant mean depth surface within the 3D depth model guess trials; another for forward density modeling that uses the initial forward density constraint assumptions of the 3D homogenous two-layered density model guess trials; and a third for depth inverse modeling that incorporates both of those for recovering Oldenburg’s model with the lowest possible error.

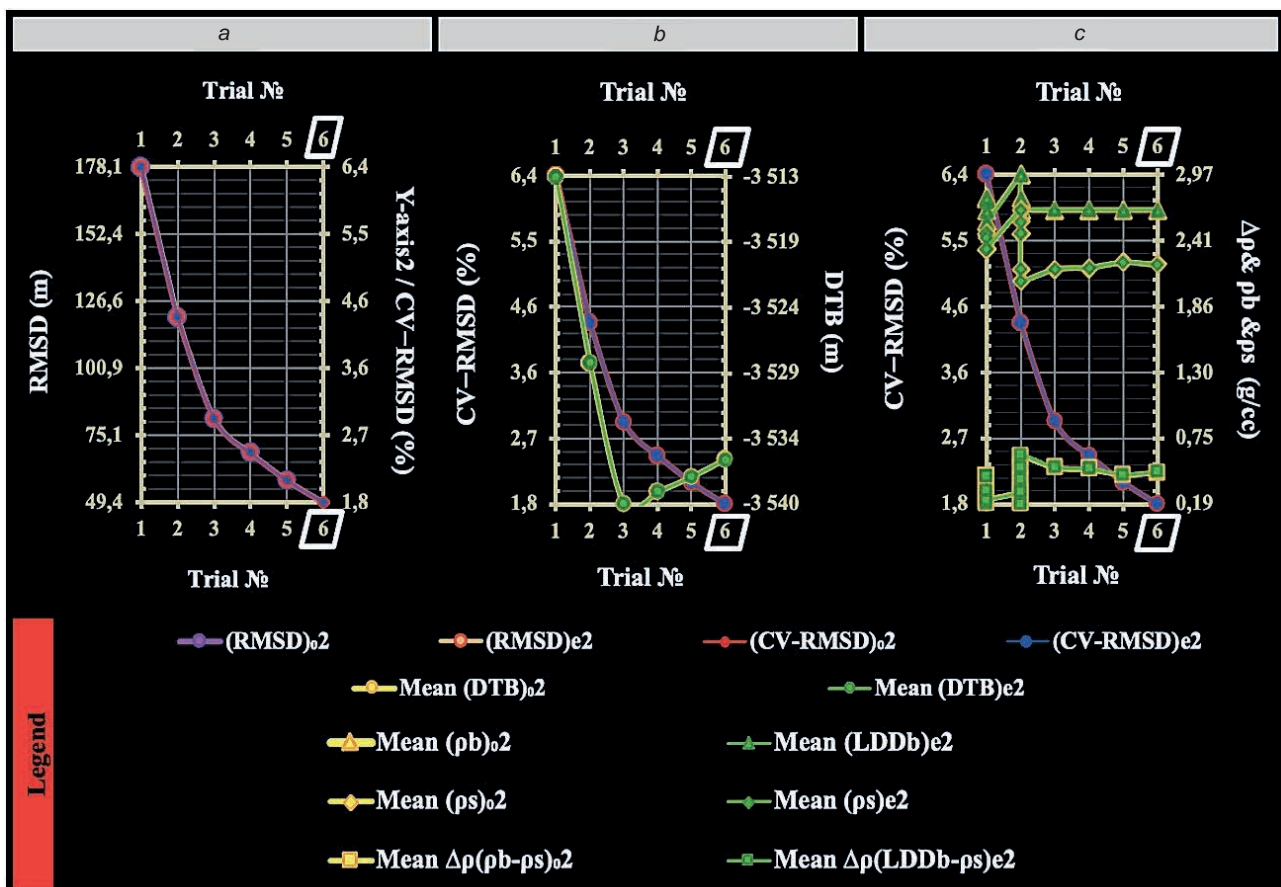


Figure 4. Three interconnected graphs (a–c) show the second-stage data analysis for density inverse modeling in the inversion scheme. These graphs show the second stage of initial guesses and inverse estimates of erroneous modeling parameterization for basement depth, density, and density contrast on the y-axis. Initial depth error guesses seven trials on the x-axis controlled inverse estimation. With a 1.87 percent error, the sixth trial’s optimal solution was likely depth-constrained. Tables 2.1 and 2.2 list all abbreviations
 Рисунок 4. Три взаимосвязанных графика (а–с) показывают анализ данных второго этапа для моделирования инверсивной плотности в схеме инверсии. Эти графики показывают второй этап исходных предположений и обратных оценок ошибочной параметризации моделирования глубины фундамента, плотности и контраста плотности по оси у. Начальная погрешность глубины предполагает семь попыток обратной оценки, контролируемой по оси х. С ошибкой в 1,87 % оптимальное решение шестого испытания, вероятно, было ограничено по глубине. В табл. 2.1 и 2.2 перечислены все сокращения

In the second stage, three further optimization strategies are proposed: One is forward depth modeling, where the initial forward variable depth surface has been used within the 3D depth model guess trials with varying depth guessing errors, imposing error reduction constraint assumptions from trial to trial for parameterization sequences' constraining; another strategy for forward density modeling that applies constraints to the density contrast guess trials of the initial 3D constant mean density contrast interface is to separate several guess trials of a homogeneous two-layered density model; and a third for density inverse modeling that incorporates both of those second stage's aforementioned forward strategies for recovering the densities best possible solutions.

The third final stage used three additional optimization strategies: one for forward depth modeling, which uses an unconstrained version of the forward variable depth constraint assumptions derived from the trials of inverted 3D possible depth models with varying errors in depth calculations; another for forward density modeling, which uses the constrained version of second stage's inverted lateral density possible models; and third strategy for the inverse depth modeling, which makes use of these constraint versions sought to evaluate the best possible density and density contrast model solutions,

leading to the best possible basement depth model solution with the minimal inaccuracies. We achieved this low error by repeatedly refining depth-density model solutions inside the density contrast constrained-unconstrained optimization scenario between the second and third stages of the proposed inversion approach.

Results and discussion

A Comparison of the best-possible models in three stages. We identified that for three best-possible forward models, we could obtain three best-possible inverse models, resulting in minimal error optimal solutions constrained by the three initial best-possible mean depth error guessing trials, as highlighted in fig. 3, 4, 5. Each stage uses a different strategy to generate forward models and locate their matching inverse solutions. The model's optimality in minimizing calculational error validated its reliability and efficacy based on an inversion results analysis conducted on the entire study area and individual locations.

These forward models were started with the optimal forward initial parameterization guessing sequences, which included these parameters for the first stage: Z_0 -3470 m, ρ_{b0} 2.77 g/cc, ρ_{s0} 2.34 g/cc, $\Delta\rho(\rho_b-\rho_s)_0$ 0.43 g/cc, Δd_0 37.65 mGal, D_c shift 37.652 mGal, filter LHC limit 14000 m, filter UHC limit 7500 m, convergence limit 0.01 mGal, and regional offset

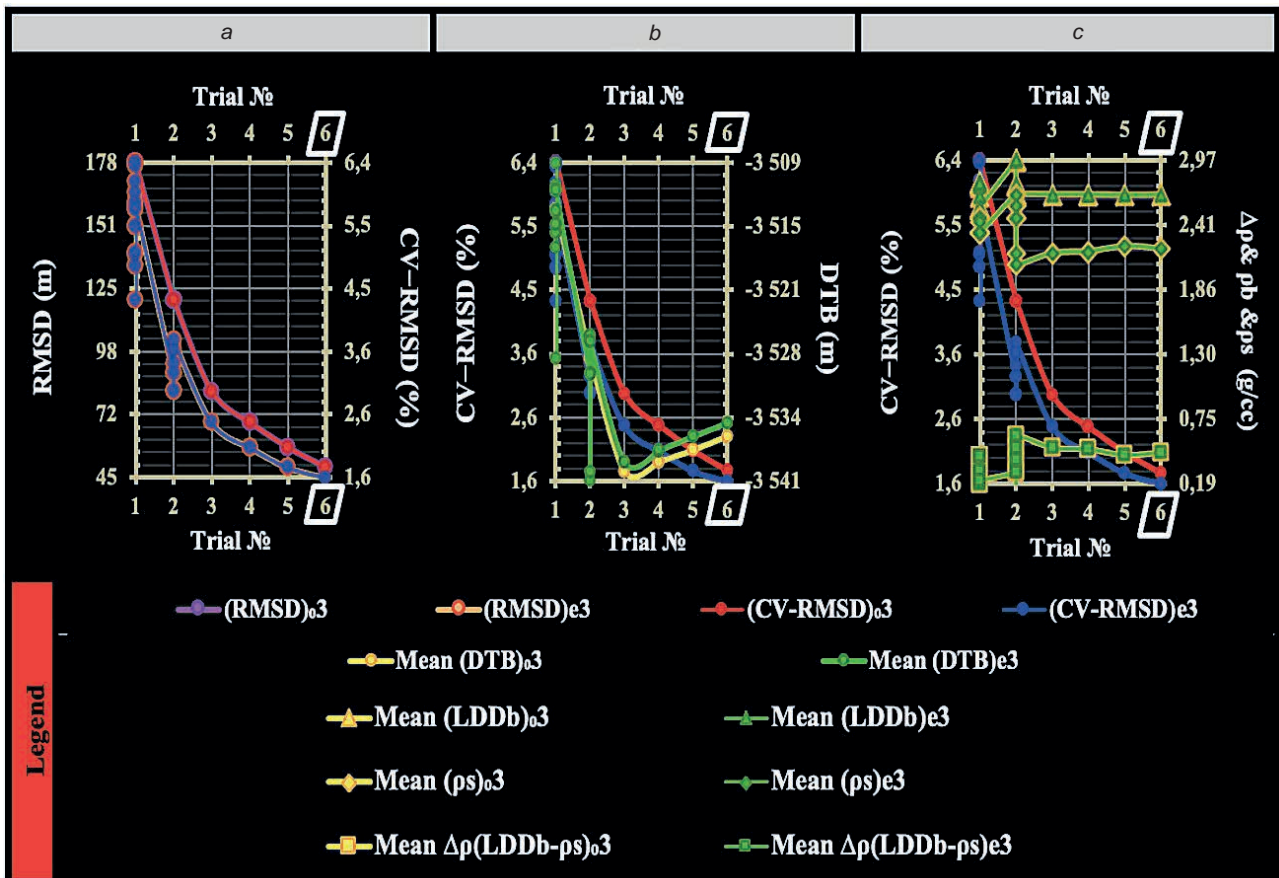


Figure 5. Three interconnected graphs (a–c) show the third-stage data analysis for depth inverse modeling in the proposed inversion scheme. These graphs show the third stage of initial guesses and inverse estimates of erroneous modeling parameterization for basement depth, density, and density contrast on the y-axis. Initial depth error guesses seven trials on the x-axis controlled inverse estimation. With a 1.63 percent error, the sixth trial's optimal solution was optimally estimated. Tables 2.1 and 2.2 list all abbreviations. Рисунок 5. Три взаимосвязанных графика (а–с) показывают анализ данных третьего этапа для глубинного инверсивного моделирования в предлагаемой схеме инверсии. Эти графики показывают третий этап исходных предположений и обратных оценок ошибочной параметризации моделирования глубины фундамента, плотности и контраста плотности по оси y. Начальная погрешность глубины предполагает семь попыток обратной оценки, контролируемой по оси x. С ошибкой 1,63 % оптимальное решение шестого испытания было оценено оптимально. В табл. 2.1 и 2.2 перечислены все сокращения

0 mGal. These inputs started the forward modeling guesswork process with 43.6% inaccuracy. For the second stage, these parameters were included: Z_0 -3536 m, ρ_b 2.67 g/cc, ρ_s 2.21 g/cc, $\Delta\rho(\rho_b-\rho_s)_e$ 0.46 g/cc, Δd_0 42.661 mGal, D_c shift 42.661 mGal, filter LHC limit 10000 m, filter UHC limit 9600 m, convergence limit 0.0054 mGal, and regional offset 0 mGal, with 1.78% error in forward modeling guessing. Finally, for the third stage, these parameters were included: Z_0 -3536 m, $LDDb_0$ 2.6706 g/cc, ρ_s 2.21 g/cc, $\Delta\rho(LDDb-\rho_s)_e$ 0.4606 g/cc, Δd_0 42.670 mGal, D_c shift 42.670 mGal, filter LHC limit 20000 m, filter UHC limit 15000 m, convergence limit 0.0001 mGal, and regional offset 0 mGal, with 1.78% error in forward modeling guessing.

The estimated parameters recovered the first stage's optimal inverse model as follows: Z_e -3513 m, ρ_{be} 2.77 g/cc, ρ_{se} 2.34 g/cc, $\Delta\rho(\rho_b-\rho_s)_e$ 0.43 g/cc, Δd_e 0.0506 mGal, D_c shift 37.652 mGal, filter LHC limit 14000 m, filter UHC limit 7500 m, convergence limit 0.01 mGal, and regional offset 0 mGal. These parameters were estimated with a 6.4% error. Second, recovered the second stage's optimal inverse model by this sequence (Z_e -3536 m, $LDDb_e$ 2.6706 g/cc, ρ_{se} 2.21 g/cc, $\Delta\rho(LDDb-\rho_s)_e$ 0.4606 g/cc, Δd_e 0.0094 mGal, D_c shift 42.661 mGal, filter LHC limit 10000 m, filter UHC limit 9600 m, convergence limit 0.0054 mGal, and regional offset 0 mGal), with 1.78% estimation error. Finally, recovered the third stage's optimal inverse model by this sequence (Z_e -3534.6 m, $LDDb_e$ 2.6706 g/cc,

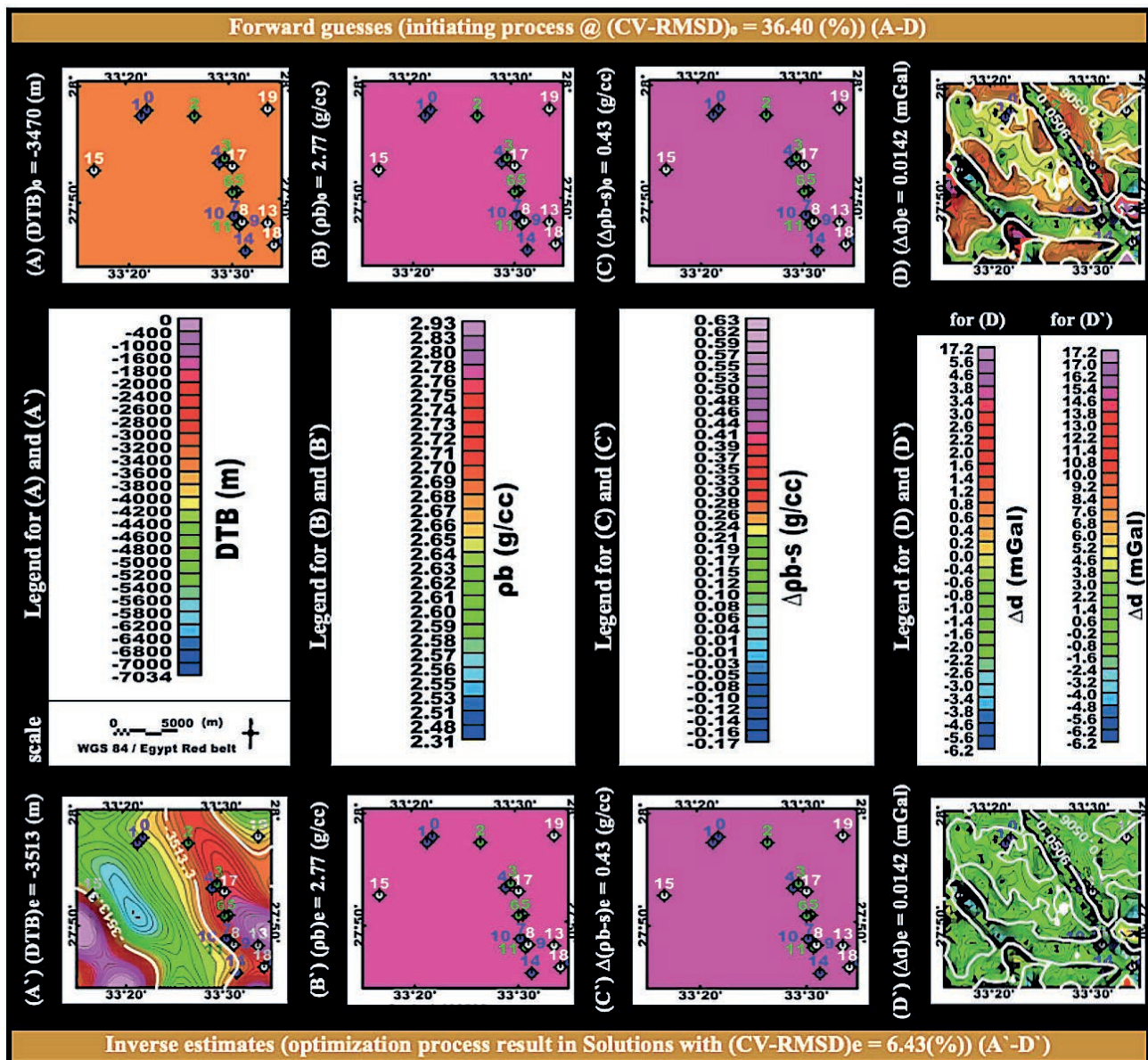


Figure 6. The first stage of the inversion scheme involves making optimal forward guesses and inverse estimates for four parameters: DTB , ρ_b , $\Delta\rho_b-s$, and Δd . These parameters relate to the complex basement depth (maps A and A'), density (maps B and B'), and density contrast interface with the overlaid sediment layer (maps C and C'), as well as the data misfit residual Bouguer anomalies (maps D and D'). All maps for each parameter share the same legend and scale

Рисунок 6. Первый этап схемы инверсии включает в себя получение оптимальных прямых предположений и обратных оценок для четырех параметров: DTB , ρ_b , $\Delta\rho_b-s$ и Δd . Эти параметры относятся к комплексной глубине фундамента (карты A и A'), плотности (карты B и B') и границе контраста плотности с перекрытым слоем осадочных пород (карты C и C'), а также данные, не соответствующие остаточным аномалиям Буге (карты D и D'). Все карты для каждого параметра имеют одну и ту же легенду и масштаб

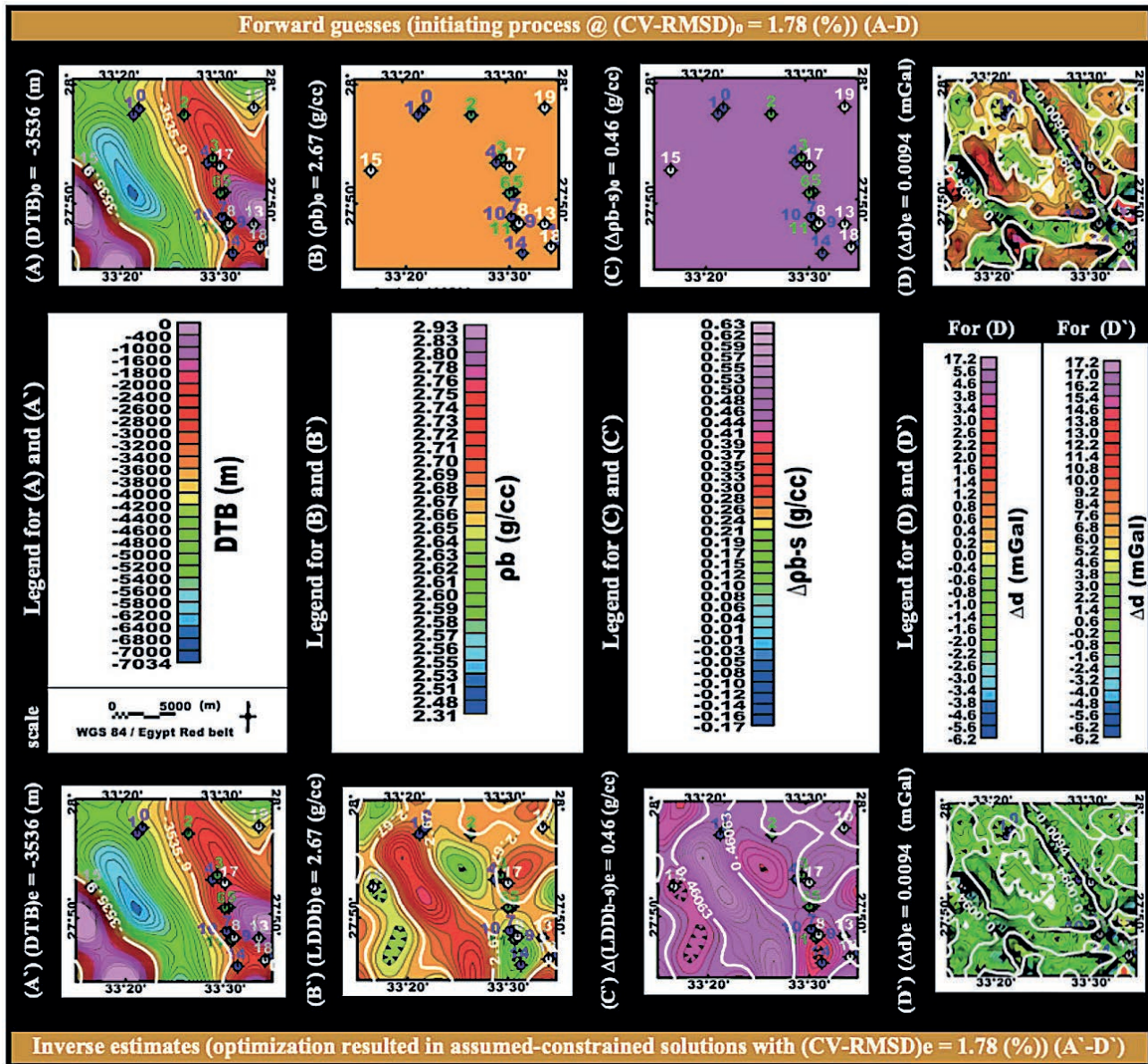


Figure 7. The inversion scheme’s second-stage initial parameterizations and their optimally estimated best-possible inverse estimates of the basement depth (maps A and A’), complex basement density (maps B and B’), basement-sediment density contrast interface (maps C and C’), and data misfit residual Bouguer anomalies (maps D and D’). The forward guess and inverse estimate maps have the same legend for each parameter to facilitate comparison

Рисунок 7. Начальные параметризации второго этапа инверсии и их оптимально оцененные наилучшие обратные оценки глубины фундамента (карты A и A’), комплексной плотности фундамента (карты B и B’), границы контраста плотности фундамента и отложений (карты C и C’) и данные, не соответствующие остаточным аномалиям Буге (карты D и D’). Карты прямого предположения и обратной оценки имеют одинаковую легенду для каждого параметра, чтобы облегчить сравнение

ρ_{se} 2.21 g/cc, $\Delta\rho(LDDb-ps)$ 0.4606 g/cc, Δd_e 0.0045 mGal, D_c shift 42.670 mGal, filter LHC limit 20000 m, filter UHC limit 15000 m, convergence limit 0.0001 mGal, and regional offset 0 mGal), with 1.63% estimation error.

We subsequently linked the three-stage best-possible inverse parameterization estimates and their errors to assess our scheme’s overall optimality in minimizing computational error within this gradual improvement (first, 6.4; then, 1.78; finally, 1.63%) from the first to the third stage. This error sequence resulted from iteratively optimizing in the presence of zero regional offsets used as a data-misfit constraint within the three stages, the mean depth key parameter (first, -3513; then, -3536; finally, -3534.6 m), the mean density contrast key parameter (0.43; 0.4606; 0.4606 g/cc), the filter LHC limit constraint parameters

(14000; 10000; 20000 m), the filter UHC limit constraint parameters (7500; 9600; 15000 m), the convergence limit constraint parameter (0.01; 0.0054; 0.0001 mGal), and the DC shift constraint parameter (37.652; 42.661; 42.670 mGal).

Quantitative interpretation. Fig. 6, 7, 8 show the best forward initial guesses and inverse estimates for the proposed inversion scheme’s first, second, and third stages. Using a quantitative interpretation of the inverse outcomes, we were able to conclude the following about the optimality of the key and constraint model parameters that make up the inverse optimal parameterization sequence in the inversion scheme’s third-last stage:

1. As illustrated in maps A and A’ in fig. 8, the third stage’s optimal inversion process’s initial forward depth model

with guessing parameters of Mean DTB_0 –3535.9, Max. DTB_0 –6460.9, Min. DTB_0 0, and SD DTB_0 1564.8 m, with an initial depth inaccuracy of 1.78%, yielding the most optimal inversely estimated depth parameters of (Mean $DTBe$ –3534.6, Max. $DTBe$ –6453.2, Min. $DTBe$ 0, and SD $DTBe$ 1567.4 m) estimated with a 1.63% depth error. The forward initial mean depth parameter (Mean $DTB_0 = -3535.9$ m) is the closest approximation to the optimal basement mean depth (Mean $DTBe = -3534.6$ m) in the study area. Map A's basement geological alteration demonstrates that two primary normal faults from the surface to considerable depths created the Graben system underneath the study area. The outcropping basement rocks in the geological map fit the second-best depth param-

eter (Min. $DTBe = 0$ m). The third-best maximum depth model parameter shows that the two main normal faults extend to –6453.2 meters below sea level in the middle basinal area. Minor faults run alongside the primary southeast-to-northwest normal faults on both sides of the central graben. The basement complex's two normal faults generated the huge sedimentary basin between the eastern El-Zeit and western Esh El Mallaha mountain ranges in the study area.

2. Third stage of our inversion scheme's optimal inversion process started with optimal initial forward density guessing parameters of (Mean $LDDb_0$ 2.6706, Max. $LDDb_0$ 2.7558, Min. $LDDb_0$ 2.5935, and SD $LDDb_0$ 0.0294 g/cc) as a 1.74% error constraint assumption, resulting in the best possible

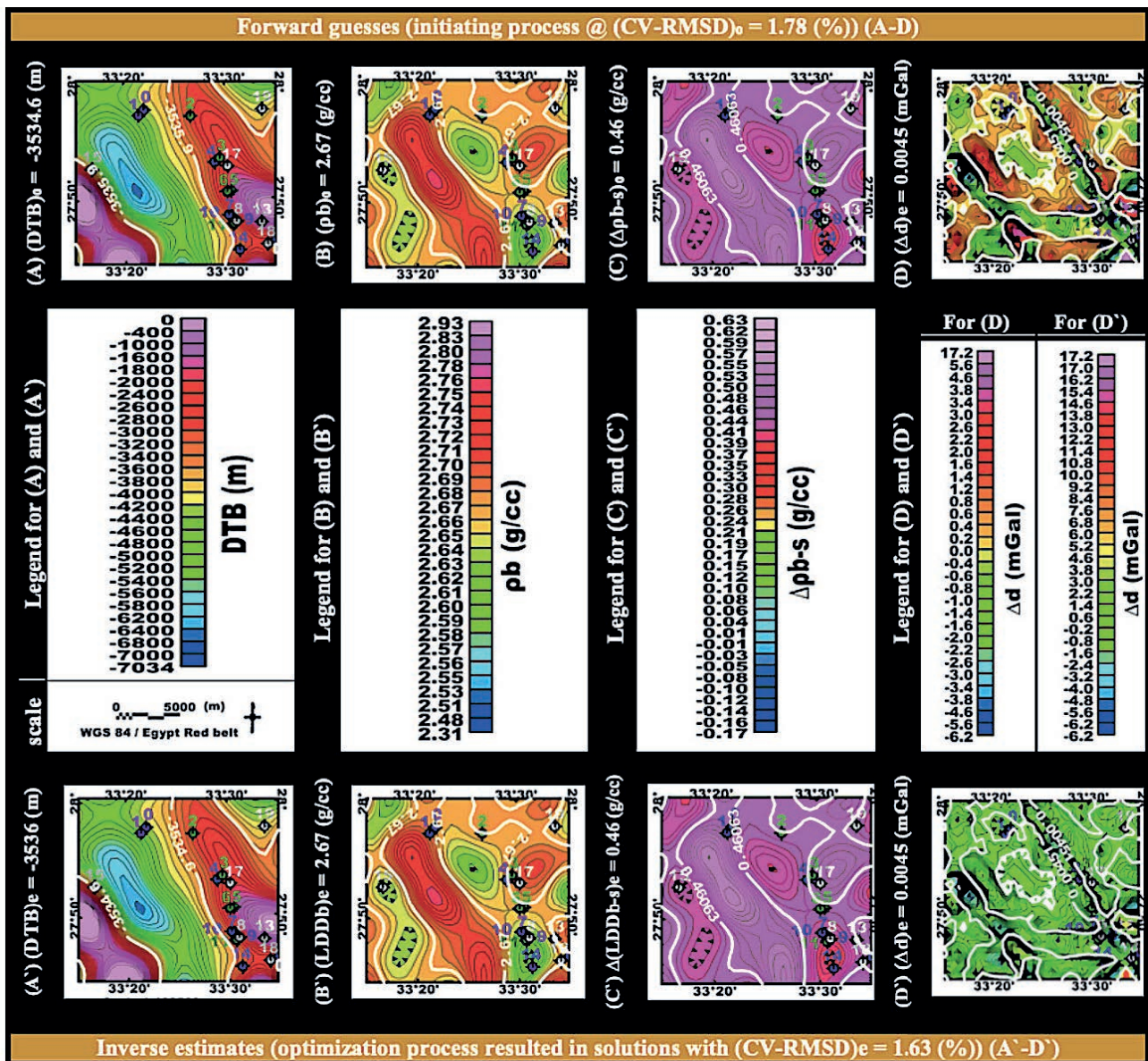


Figure 8. Our inversion scheme's last third stage optimally initiated forward guesses and their resultant optimal estimates for four parameters with a 1.63% error in the estimation of the basement depth (maps A and A'), the complex basement density (maps B and B'), the basement-sedimentary density contrast interface (maps C and C'), and the data misfit residual Bouguer anomalies (maps D and D'). For ease of comparison, each parameter's forward-guessed and inversely estimated maps share the same legend

Рисунок 8. Последний третий этап нашей схемы инверсии оптимально инициировал упреждающие предположения и их суммарные оптимальные оценки для четырех параметров с ошибкой 1,63% в оценке глубины фундамента (карты A и A'), комплексной плотности фундамента (карты B и B'), границы контраста плотности фундамента и осадочных пород (карты C и C') и несоответствия данных остаточным аномалиям Буге (карты D и D'). Для простоты сравнения карты каждого параметра с прямой и обратной оценкой имеют одну и ту же легенду

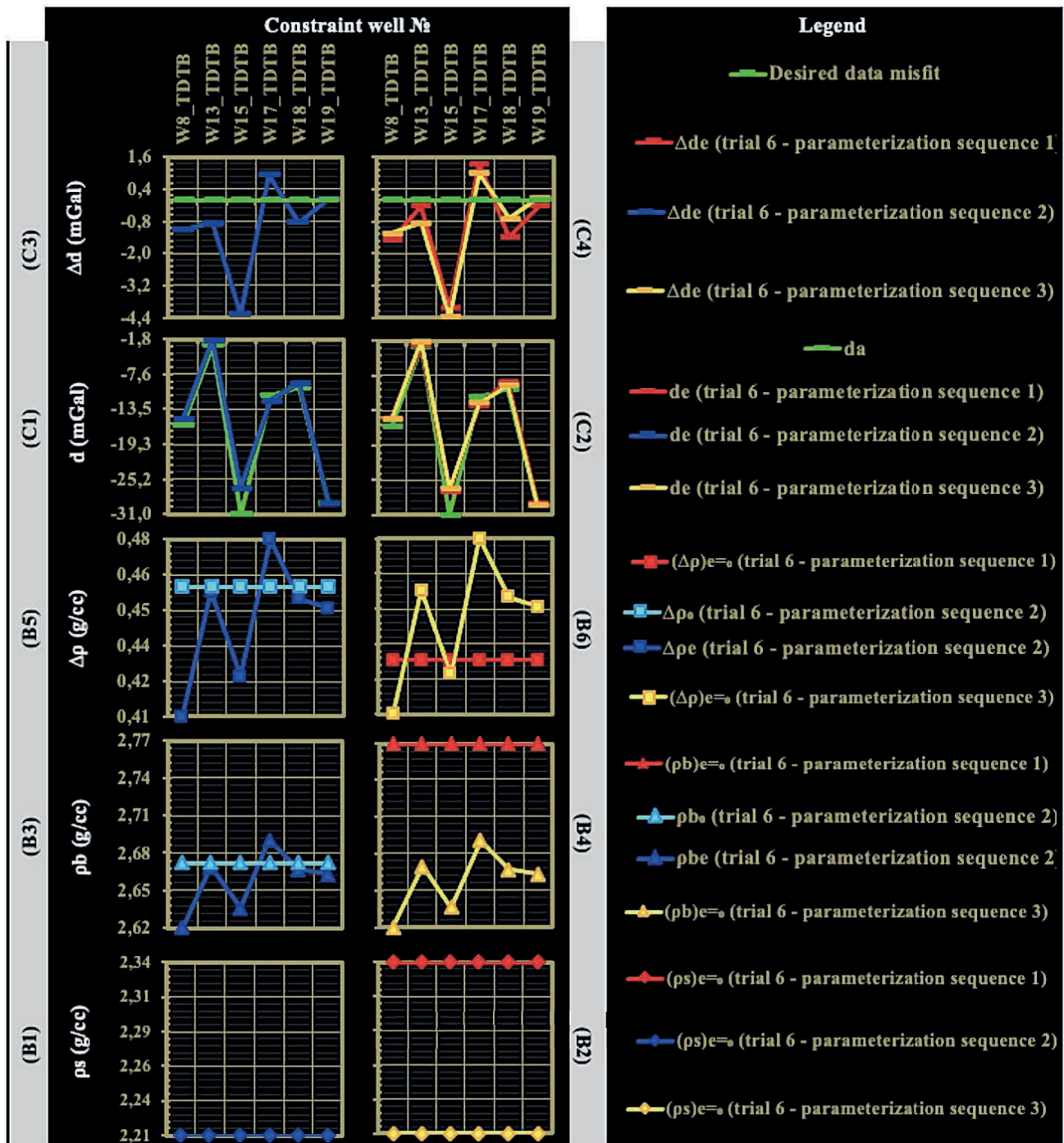


Figure 9.1. Continued in figures 9.2
Рисунок 9.1. Продолжение на рис. 9.2

constrained density parameters of Mean $LDDbe$ 2.6706, Max $LDDbe$ 2.7558, Min $LDDbe$ 2.5935, and $SD LDDbe$ 0.0294 g/cc. These estimates produced a density solution with a default 1.63% computed depth inaccuracy. The initial 2.6706 mGal mean density parameter on Map B' in fig. 8 suggests that granitic basement rocks dominate the basement complex's lateral mean density distribution in the study area. The second and third $LDDbe$ density parameters (minimum 2.5935 and maximum 2.7558 g/cc) describe acidic igneous rock densities in which the basement depth laterally confines and best matches prior information. Working in that density space helps recover the optimal inverse estimated depth model. Basement rocks outcrop at zero depth (Fig. 8), map B' .

3. In addition, the basement-sedimentary interface in the study area has been interpreted as a density contrast constraining assumption within the optimal sixth inverse depth modeling trial of our inversion scheme's third stage, with the following parameters: Mean 0.4606, Max 0.5458, Min 0.3835, and SD 0.0294 g/cc. The optimal initialized forward modeling, incorporating initially limited forward density contrast parameters (Mean 0.4606, Max 0.5458, Min 0.3835, and SD 0.0294 g/cc), yielded these optimum inverse density contrast assumptions. As shown in Map C' of fig. 8, the mean lateral density contrast (Mean $\Delta\rho(LDDb-\rho_s)e$ 0.4606 g/cc) was confined to optimize distribution on the sedimentary section-basement complex interface in the research area, with maximum and minimum

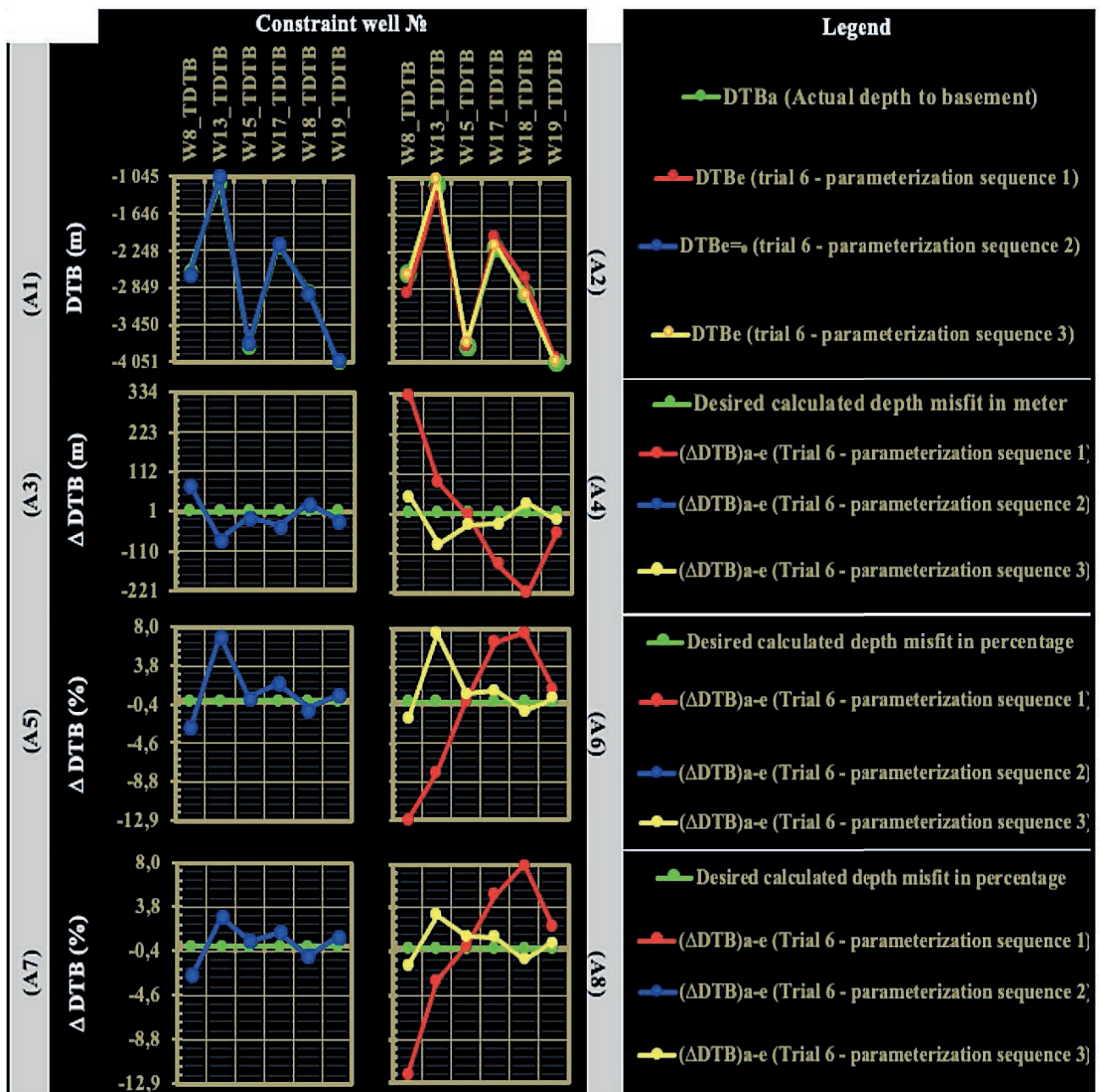


Figure 9.2. An extension of the preceding figure 9.1, together illustrating the three-stage inversion scheme’s six basement total depth constraint wells’ focused data analysis (shown in figures 9.1 and 9.2) illustrates the indirect constraining process of the three best-possible models’ solutions for the entire research area. Checks for quality control tests ensure that the best outcomes correspond as closely as possible to real constraints and desired solutions. The red, blue, and yellow sequences indicate the first, second, and third best-possible solutions. Green circles represent the quality solutions that are desired. Tables 2.1 and 2.2 have a thorough list of abbreviations

Рисунок 9.2. Расширение предыдущего рис. 9.1, иллюстрирующее анализ данных шести скважин с ограниченной глубиной фундамента трехступенчатой схемы инверсии (показанной на рис. 9.1 и 9.2), иллюстрирует процесс косвенного ограничения решений трех наилучших моделей для всей области исследований. Проверки по контролю качества гарантируют, что наилучшие результаты максимально соответствуют реальным ограничениям и желаемым решениям. Красная, синяя и желтая последовательности обозначают первое, второе и третье наилучшие возможные решения. Зеленые круги обозначают желаемые качественные решения. В табл. 2.1 и 2.2 приведен подробный список сокращений

bounds of 0.5458 and 0.3835 g/cc, respectively. These optimized density contrast parameters and its best constraint assumption at the interfaced surface provided an optimal El-Zeit sedimentary-basement basalinal depth model in the study area with a mean minimum error of 1.63% in delineations.

4. We investigated the data-misfit parameters (Mean 0.0045, Max 14.2795, Min -4.9724, and SD 1.3111 mGal) to in-

terpret the optimal model’s Bouguer response. Fig. 8 illustrates the lateral distribution of linear and normal-colored Bouguer anomalous misfits after recovering the optimal inverse-estimated model’s solutions. Map D’s linear color legend shows the minimal mean data misfit estimations of 0.0045 mGal, covering practically the whole study area between estimated and observed Bouguer anomalies with means of $de = -24.9139$

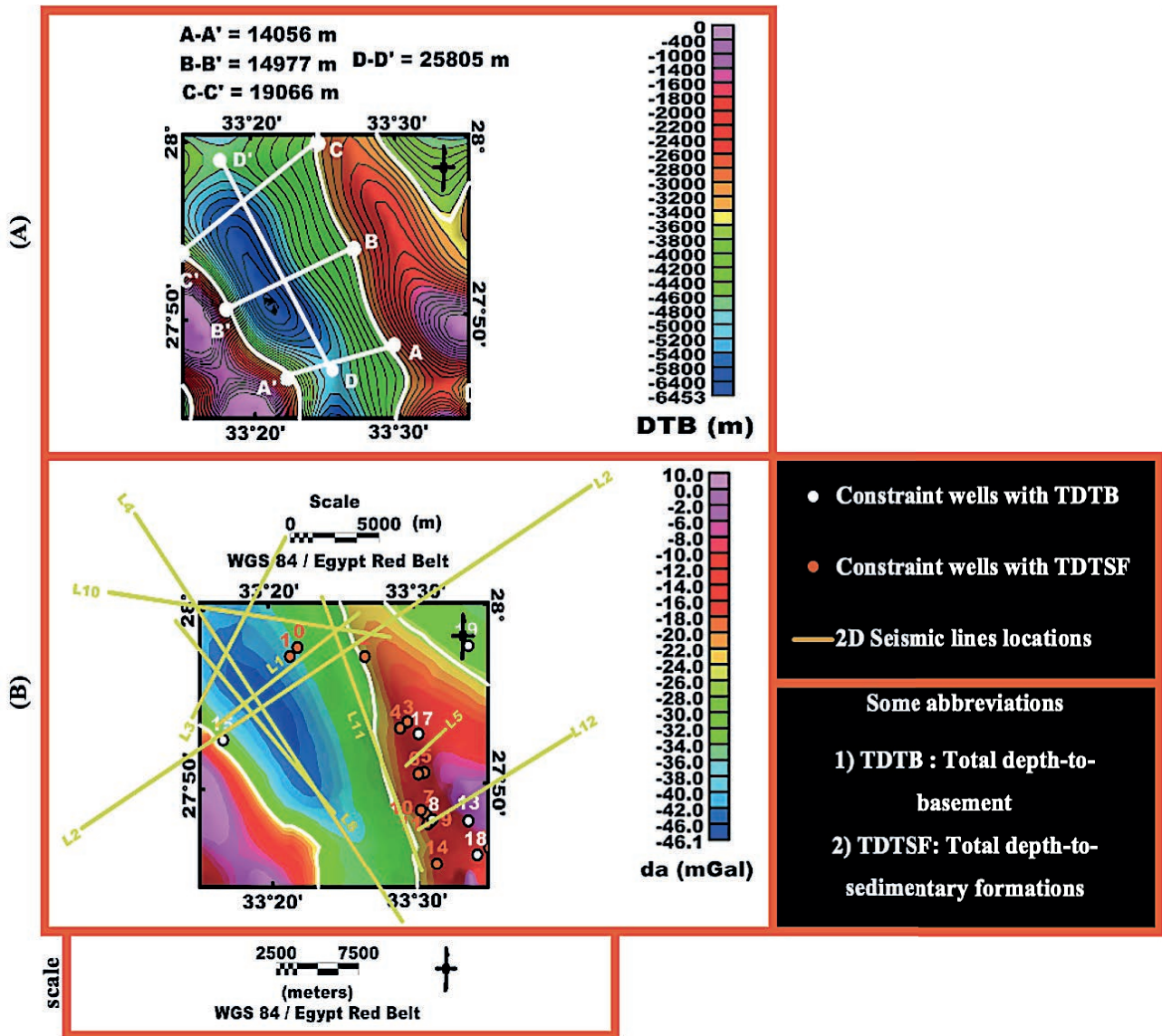


Figure 10.1. Continued in figures 10.2
 Рисунок 10.1. Продолжение на рис. 10.2

and $da = -24.9094$. The mean Bouguer anomaly's misfit optimality is bounded by 14.2795 and -4.9724 mGal. Map *D* in Fig. 7 shows how the substructure of elongated basins in the sedimentary layer above the basement complex along two significant normal faults provided the first viable migration and oil accumulation zones. These extended basins produced low Bouguer anomalies on Map *D*. These basins formed when the graben system's two main normal faults squeezed sedimentary layers over a basement complex. Over the middle El-Zeit basin, fault compression forms subsidiary sedimentary basins.

5. These best constraint parameters of Dc shift 42.6709 mGal, filter LHC limit 20 000 m, filter UHC limit 15 000 m, convergence limit 0.0001 mGal, and regional offset 0 mGal maximally constrained the third last stage's inverse-estimated parameterization sequence's optimality, resulting in the optimal model's minimal errored solutions. The first constraint parameter (DC shift = 42.6709 mGal) was utilized to predict the forward initial mean depth parameter (Mean $DTB_0 = -3536$ m), estimating the inverse mean depth parameter (Mean $DTBe = -3534.6$ m). The second constraint parameter (filter LHC limit

= 20 000 m) smoothed the optimal inverse-estimated mean density-depth model and its calculated mean Bouguer anomaly response. The third constraint parameter (filter UHC limit = 15 000 m) optimized the impact of the second constraint. The second and third parameters govern the model's solution and their data calculation smoothness and non-smoothness. The calculated and observed Bouguer anomalies are best fit with a mean misfit $\Delta de = 0.0045$ mGal when the fourth regional offset constraint parameter is zero after recovering the optimal inverse model's solutions in the study area. The inversion run stops when the standard deviation difference between the last two iterations' data misfit is less than the fifth convergence limit parameter, which equals 0.0001 mGal. The fourth and fifth constraint parameters help estimate the optimal inverse model solution with minimal computational errors.

Evaluation of the inversion stages

Through indirect analysis of drilled-well data

1 & 2. Fig. 9.1 and 9.2 show constraint wells for quality control and optimal inversion solution testing. The study area

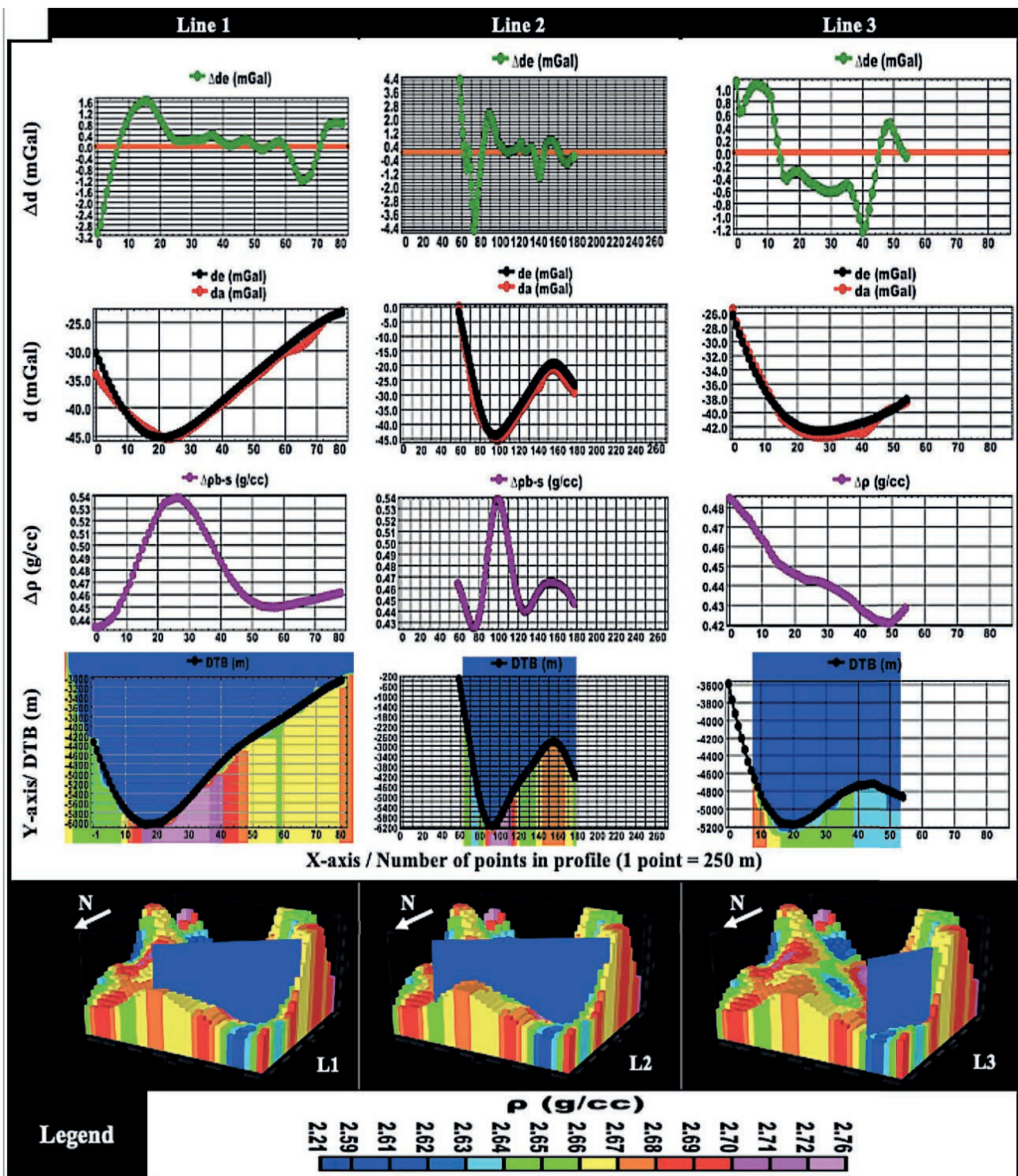


Figure 10.2. Continuation of figure 10.1. Continued in figures 10.3
 Рисунок 10.2. Продолжение рис. 10.1. Продолжение на рис. 10.3

had nineteen wells, and a gravity inversion was used to get the optimal 3D basement estimated depth. The DC shift, convergence limit, regional offset, and filter lower and upper high cut limits were adjusted to manage the misfits of calculated data and model solutions from the constraints of actual measured values. After inversion, basement constraint wells were used as a first quality control test to ensure the inverse depth values stayed inside the analytic depth domain. As a second quality control, we checked whether the optimal inverted depth to the

basement was more profound than the total depth of the thirteen unreachable basement constraint wells.

Indirect usage of the first and second controls reflects a forward-initiated unconstrained model without strong depth constraints, inverting the lateral 3D optimal final depth solution with minimal error. This strategy works better with less prior information and considers applying the proposed inversion scheme to a new domain requiring more data for reliable predictions.

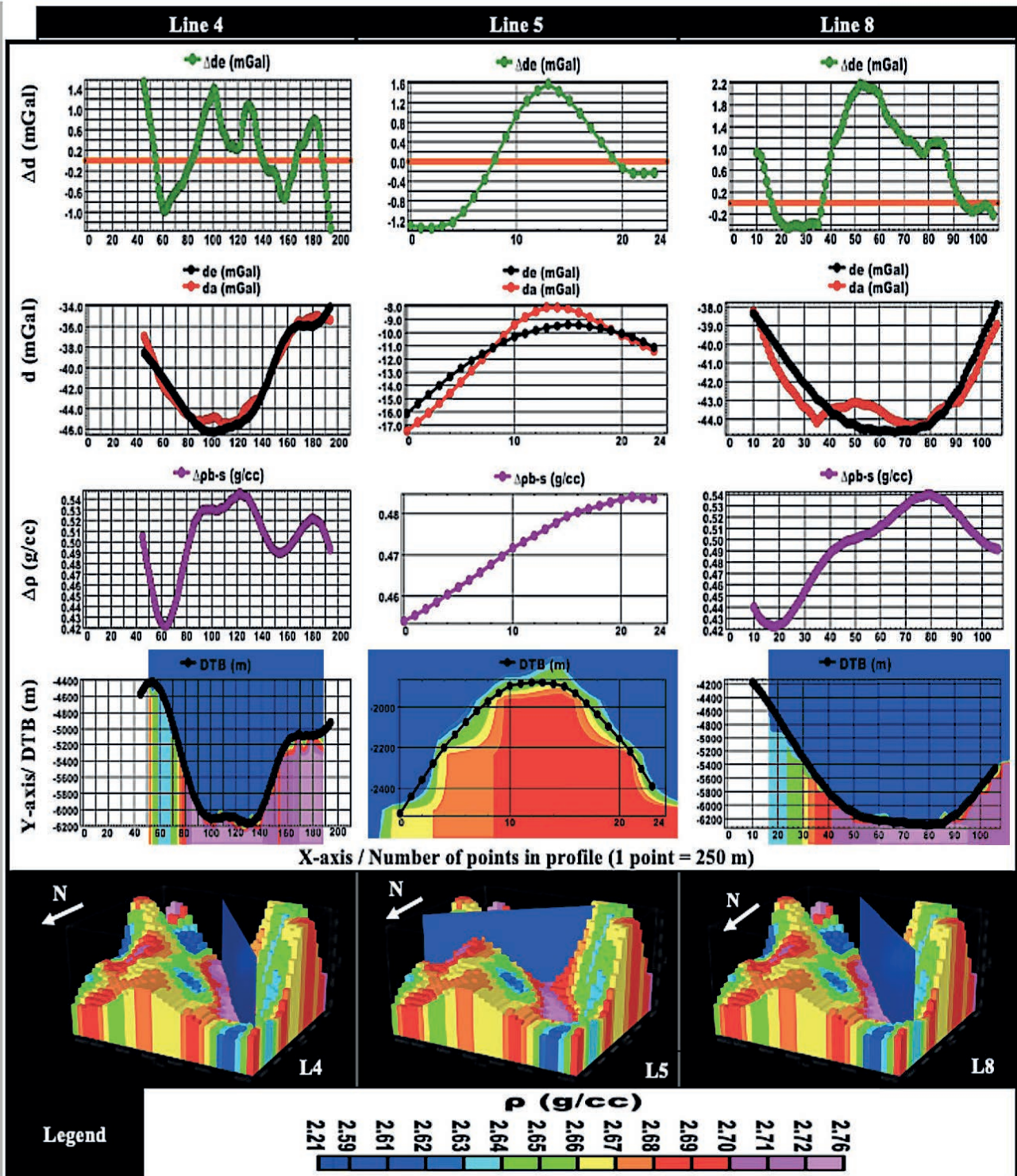


Figure 10.3. An extension of the preceding figures 10.1, 10.2, and 10.3, together illustrating the efficacy of the inversion scheme’s third-last stage in extracting two-dimensional gravity models at various seismic line locations (shown in figures 10.1, 10.2, 10.3, and 10.4) for tackling seismic challenges in the research area. The solutions were tested to see if they could optimally identify, with minimal misfit between observed and estimated Bouguer responses, the interface between the basement and the sediment in terms of density contrast and the basement’s depth and lateral density distribution. These tests are carried out to better assess the efficiency of the certified 3D extraction source

Рисунок 10.3. Расширение предыдущих рис. 10.1, 10.2 и 10.3, иллюстрирующее эффективность третьего и последнего этапа схемы инверсии при извлечении двумерных гравитационных моделей в различных местоположениях сейсмических линий (показано на рис. 10.1, 10.2, 10.3 и 10.4) для решения сейсмических задач в районе исследований. Решения были протестированы, чтобы увидеть, могут ли они оптимально идентифицировать, с минимальным несоответствием между наблюдаемыми и оцененными откликами Буге, границу раздела между фундаментом и отложениями с точки зрения контраста плотности, а также глубины фундамента и распределения плотности по латерали. Эти испытания проводятся для лучшей оценки эффективности сертифицированного 3D-источника извлечения

3. We examined lateral basement density and basement-sedimentary density contrast in the fourth control test to assess our inversion scheme's inverse density estimations. This control test determined whether a lateral density model could optimize the basement-sedimentary density contrast and determine the basement depth with minimal depth estimate error. Graphs B1, B2, B3, B4, B5, and B6 in [fig. 9.1](#) show the results of this test.

4. This study compared the calculated and actual Bouguer anomalies at nineteen easily accessible control wells. A tertiary control test performed across the region may provide a mean data misfit near zero by terminating the inversion process at regional null offsets. This scenario shows a minimal data misfit consistent with the best solution of the depth-density model. [Fig. 9.1](#), graphs C1, C2, C3, and C4, provide proof of this.

[Fig. 9.2](#), graphs (A2 and A4) demonstrate that the mean basement depth model's sixth optimal inverse trial produced the lowest model calculation error for the first stage of our inversion scheme. First-stage optimality shows a correlation between the actual and estimated basement depths of the six constraint wells in the following order: W8 – 333.6, W13 – 87.8, W15 2.0, W17 138.8, W18 221.2, and W19 55.7 m, as a result of depth estimates in the following sequence: (W8 – 2910.6, W13 – 1216.68, W15 – 3767, W17 – 2023.1, W18 – 2686.7, and W19 – 3995.3 m). In the third stage of our scheme, we adjusted the basement depth model by minimizing the misfit with the best correlation to actual depths using an estimated depth sequence (W8 – 2624, W13 – 1044.2, W15 – 3738.7, W17 – 2135.4, W18 – 2938.3, and W19 – 4035.5 m) with a more significant reduction of the depth misfit sequence (W8 – 46.9, W13 84.7, W15 30.2, W17 26.5, W18 – 30.2, W19 15.4 m). The depth misfit sequence shows that the optimal depth model in the third stage of our scheme is more accurate.

Graph A6 Sequenced percentage depth misfit estimates: In the sixth optimal depth misfit trial, for the first stage, W8 12.9, W13 7.7, W15 – 0.05, W17 – 6.4, W18 – 7.60, and W19 – 1.37 %; for the third stage, W8 1.8, W13 7.5, W15 0.8, W17 1.2, W18 1.0, and W19 – 0.4%.

Graph A8 shows the re-estimated optimal depth misfit sequences relative to the six constraint wells' actual mean basement depth, showing the percentage coefficients of variation for each well. For example, the sixth optimal depth misfit sequence in the first stage is re-estimated by W8 12.0, W13 13.2, W15 – 0.07, W17 – 5.0, W18 – 7.9, and W19 – 2.0%, while in the third stage, W8 1.7, W13 – 3.0, W15 – 1.1, W17 – 0.9, W18 1.1, and W19 – 0.5%.

As illustrated in graphs B3 and B4, the constrained mean density trial was distributed among the six controlled wells by lateral density sequence: W8 2.617, W13 2.668, W15 2.634, W17 2.689, W18 2.665, and W19 2.661 g/cc.

[Fig. 9.1](#). Graph C4 depicts the six wells (W8 – 1.254, W13 – 0.856, W15 – 4.414, W17 1.000, W18 – 0.704, and W19 0.088 mGal) in this data-misfit sequence between estimated and observed data constraints, used to constrain basement depth.

Through extraction of 2D gravity models at seismic lines' locations

5. Our inversion scheme's 3D gravity inverse optimal depth-density model solution's fifth quality control test gen-

erated 2D gravity model cross sections at 2D seismic line locations along the El Zeit basin's underlying basement relief. [Fig. 10.1](#), [10.2](#), and [10.3](#) show minimal Bouguer misfits for the 2D optimal solutions of the basement complex lateral density distribution, the basement-sedimentary density contrast interface, and the basement depth.

As shown in [fig. 10.1](#) map A, indicator lines A–A'; B–B'; C–C', and D–D' (width 14056, 14977, and 19066 m * length 25805 m) indicate the asymmetrical basin's width along the northwest-southeast axis, estimated for the southern, middle, and northern parts of the basin. Delineating the optimal basement relief, which depicts the basement-sedimentary density contrast interface, shows this optimal sedimentary basin depth model.

[Fig. 10.1B](#), [10.2](#), and [10.3](#) show two-dimensional gravity inversion results along the research area's six seismic lines. Our research area's optimal three-dimensional gravity model was the sixth inverse model trial in the inverse parameterization sequence for the third final stage of our inversion scheme, from which the optimal two-dimensional gravity models were inversely modeled. The approximately minimal calculated inverse data misfit error from this sixth optimal trial validates the 2D extracted model's optimal key parameter values.

Conclusions

The present study employs the GM-SYS-3D inversion code to conduct a multi-dimensional three-stage gravity inversion within the Gebel Zeit area of the southwestern Gulf of Suez. Three strategies are utilized to parameterize the forward modeling process by providing initial approximations and optimizing inverse modeling estimates through multiple iterations. The depth-to-basement, lateral density distribution of the basement complex, and lateral density contrast at the basement-sedimentary interface were estimated using the 3D depth-density model.

A total of six stratigraphic wells, which were accessible with total depths to the basement, were utilized as control measures. The estimated depths to the basement for these basement control wells exhibited an overall 1.63% coefficient of variance in correspondence with their actual total depths to the basement. The discrepancies in depth ranged from – 1.24% to 8% relative to the measured mean depth of the basement and from – 1.24% to 3.8% relative to the total measured depth of each well's basement.

The quantitative analysis of the optimal inverse-recovered model in the third stage exhibited the best-possible correlation with geological data, with a minimal error of 1.63%. The inversion procedure was employed effectively to model the forward behavior of three depth-density scenarios inversely. This model successfully estimated the mean depth of the basement in the study area, which spanned from 0 to 6453 m beyond sea level. The resulting mean Bouguer anomaly misfit was found to be 0.0045 mGal. The average density contrast at the interface between the basement and sedimentary layers is 0.4606 g/cc, exhibiting a lateral variation ranging from 0.5458 to 0.3835. The interface delineates the central basin of the research area.

The presence of salt diapirs challenges basement delineation through seismic interpretation in two dimensions. The inverse problem of accurately recovering the optimal 3D depth-density model was handled through this model's solutions' evaluation at nine seismic lines, resulting in a well-char-

acterized representation of the basement relief. The complete recovery of the residual Bouguer image depicts the effect of the high tectonics of the underlying basement relief on its overlaid thick sedimentary structure in the study area, yielding valuable deep geological insights into the advancement of petroleum resources. The results of this study revealed the presence of a graben system characterized by two prominent normal faults that intersect sedimentary strata, originating from a depth of 6500 meters within the Earth's crust and extending up to the surface. The Gebel Zeit and Esh-Mellaha ranges exhibit geological faults that result in the exposure of underlying basement rocks. The phenomenon of basement shallowing in this particular study area is of significant interest from both tectonic and hydrocarbon perspectives.

The 3D optimal inverse recovery suggests that the study area is characterized by three distinct basement blocks, which have been accurately estimated in terms of depth, density, and density contrast with the overlaid sedimentary blocks. The first block is a downthrown block located in the middle of the area and is covered by a substantial cover of sedimentary deposits. This block is responsible for forming a basin structure known as the El Zeit basin, which reaches a maximum depth of 6453 m. The other two blocks are located on the western and eastern flanks and are considered upthrown blocks. These blocks have zero depths and are associated with the roots of the Gebel Zeit and Esh-Mellaha ranges, respectively. Numerous fault traps can be generated along fault planes where minor half-grabens are formed due to the fault compression within sedimentary layers. This compression leads to the development of elongat-

ed sub-basins above the basement complex. These sub-basins are adjacent to the basement complex, as the basement blocks uplift through the sedimentary layers and are separated from it by small anticlinal structures. These anticlinal structures increase the possibility for fault entrapment in the presence of an overlaid impermeable sedimentary layer above them. The tectonic characteristics of these sedimentary sub-basin structures are attributed to the vertical displacement of the underlying basement blocks, resulting in significant upward pressure and converging towards the central basinal region. The elementary basinal structure in El Zeit experienced tectonic activity, which played a significant role in shaping the Nubia sandstone and creating a deep reservoir formation with a substantial volume of hydrocarbons in the study area. The deep sedimentary column in the middle basinal area has the potential to serve as a source for migrating hydrocarbons through the fault planes where low pressures exist. This migration is best possibly entrapment along the hanging wall sedimentary block above the eastern and western fault planes, where small anticlinal structures can form between the compressed sedimentary structures and the fault planes. The basement foot wall block on the other sides of the fault planes laterally seals these anticlinal structures. The impermeable sedimentary layers' formations may also vertically seal them.

Disclosure of Funding Sources

The researcher Ahmed G. M. Hassan is funded by a scholarship [EGY-6958/16] under the joint (executive program between Arab republic of Egypt and Russia).

REFERENCES

- Jessell M. et al. 2014, Next Generation Three-Dimensional Geologic Modeling and Inversion. Building Exploration Capability for the 21st Century. Chapter 13. Karen D. Kelley and Howard C. Golden (eds). Littleton, Colorado, USA: Society of Economic Geologists, , pp. 261–272. <https://doi.org/10.5382/SP.18.13>
- Fan D., Li S., Li X., Yang J., Wan X. 2021, Seafloor Topography Estimation from Gravity Anomaly and Vertical Gravity Gradient Using Nonlinear Iterative Least Square Method. *Remote Sensing*, vol. 13, pp. 1–19. <https://doi.org/10.3390/rs13010064>
- Silva J. B. C., Santos D. F., Gomes K. P. 2014, Fast gravity inversion of basement relief. *Geophysics*, vol. 79, no. 5, pp. G79–G91. <https://doi.org/10.1190/geo2014-0024.1>
- Pham L. T., Oksum E., Do T. D. 2018, GCH_gravinv: A MATLAB-based program for inverting gravity anomalies over sedimentary basins. *Computers & Geosciences*, vol. 120, pp. 40–47. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2018.07.009>
- Cremon M., Burnham A. K., Liu Y., Lapene A. 2017, Modified Athy-Law Compaction to Account for Porosity Generation and Preservation from Kerogen Conversion in Terzaghi-Like Models of Petroleum Source Rocks. AAPG Annual Convention and Exhibition, article number 42062, pp. 1–18.
- Wu L. 2018, Efficient Modeling of Gravity Fields Caused by Sources with Arbitrary Geometry and Arbitrary Density Distribution. *Surveys in Geophysics*, vol. 39, issue 3, pp. 401–434. <https://doi.org/10.1007/s10712-018-9461-7>
- Santos D. F., Silva J. B. C., Martins C. M., Santos R. C. S., Ramos L. C., de Araújo A. C. M. 2015, Efficient gravity inversion of discontinuous basement relief. *Geophysics*, vol. 80, no. 4, pp. G95–G106. <https://doi.org/10.1190/geo2014-0513.1>
- Preston L., Poppeliers C., Schodt D. J. 2020, Seismic Characterization of the Nevada National Security Site Using Joint Body Wave, Surface Wave, and Gravity Inversion. *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 110, no. 1, pp. 110–126. <http://dx.doi.org/10.1785/0120190151>
- Wu L. 2019, Fourier-domain modeling of gravity effects caused by polyhedral bodies. *Journal of Geodesy*, vol. 93, issue 5, pp. 635–653. <http://dx.doi.org/10.1007/s00190-018-1187-2>
- Malles K., Chakravarthi V., Ramamma B. 2019, 3D Gravity Analysis in the Spatial Domain: Model Simulation by Multiple Polygonal Cross-Sections Coupled with Exponential Density Contrast. *Pure and Applied Geophysics*, vol. 176, issue 6, pp. 2497–2511. <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02103-9>
- Wu L. 2016, Efficient modelling of gravity effects due to topographic masses using the Gauss–FFT method. *Geophysical Journal International*, vol. 205, issue 1, pp. 160–178. <https://doi.org/10.1093/gji/ggw010>
- Wu L., Lin Q. 2017, Improved Parker's method for topographic models using Chebyshev series and low rank approximation. *Geophysical Journal International*, vol. 209, issue 2, pp. 1296–1325. <https://doi.org/10.1093/gji/ggx093>
- Stolk W., Kaban M., Beekman F., Tesauro M., Mooney W. D., Cloetingh S. 2013, High resolution regional crustal models from irregularly distributed data: Application to Asia and adjacent areas. *Tectonophysics*, vol. 602, no. 6, pp. 55–68. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.01.022>
- Buccini A. 2016, Tikhonov-type iterative regularization methods for ill-posed inverse problems: theoretical aspects and applications: PhD thesis. Varese, Italy: Università degli Studi dell'Insubria.
- Dadak B. 2017, Inversion of gravity data for depth-to-basement estimate using the volume and surface integral methods: model and case study. Salt Lake City, UT, USA: The University of Utah, May, 92 p.
- Maag E., Li Y. 2018, Discrete-valued gravity inversion using the guided fuzzy c-means clustering technique. *Geophysics*, vol. 83, issue 4, pp. 1–115. <http://dx.doi.org/10.1190/geo2017-0594.1>

17. Feng X., Wang W., Yuan B. 2018, 3D gravity inversion of basement relief for a rift basin based on combined multinorm and normalized vertical derivative of the total horizontal derivative techniques. *Geophysics*, vol. 83, issue 5, pp. G107–G118. <https://doi.org/10.1190/geo2017-0678.1>
18. Cella F., Nappi R., Paoletti V., Florio G. 2021, Basement Mapping of the Fucino Basin in Central Italy by ITRESC Modeling of Gravity Data. *Geosciences*, vol. 11, no. 10, pp. 1–25. <https://doi.org/10.3390/geosciences11100398>
19. Ren Z., Chen C., Pan K., Kalscheuer T., Maurer H., Tang J. 2017, Gravity Anomalies of Arbitrary 3D Polyhedral Bodies with Horizontal and Vertical Mass Contrasts. *Surveys in Geophysics*, vol. 38, no. 2, pp. 479–502. <https://doi.org/10.1007/s10712-016-9395-x>
20. Vatankhah S., Renaut R. A., Huang X., Mickus K., Gharloghi M. 2022, Large-scale focusing joint inversion of gravity and magnetic data with Gramian constraint. *Geophysical Journal International*, vol. 230, issue 3, pp. 1585–1611. <https://doi.org/10.1093/gji/ggac138>
21. Makled W. A., Ashwah A. A. E. E., Lotfy M. M., Hegazey R. M. 2020, Anatomy of the organic carbon related to the Miocene syn-rift dysoxia of the Rudeis Formation based on foraminiferal indicators and palynofacies analysis in the Gulf of Suez, Egypt. *Marine and Petroleum Geology*, vol. 111, pp. 695–719. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2019.08.048>
22. Abuzied S. M., Kaiser M. F., Shendi E.-A. H., Abdel-Fattah M. I. 2020, Multi-criteria decision support for geothermal resources exploration based on remote sensing, GIS and geophysical techniques along the Gulf of Suez coastal area, Egypt. *Geothermics*, vol. 88, article number 101893. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2020.101893>
23. 2019, The Geology of the Arab World – An Overview. Bendaoud A., Hamimi Z., Hamoudi M., Djemai S., Zoheir B. (eds). Berlin: Springer, 560 p.
24. Temraz M., Dypvik H. 2018, The Lower Miocene Nukhul Formation (Gulf of Suez, Egypt): microfacies and reservoir characteristics. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, vol. 8, no. 1, pp. 85–98. <https://doi.org/10.1007/s13202-017-0386-3>
25. Van Dijk J., AlBloushi A., Ajayi A. T., De Vincenzi L., Ellen H., Guney H., Holloway P., Khdaouria M., McLeod I. S. 2019, Hydrocarbon exploration and production potential of the Gulf of Suez Basin in the framework of the new tectonostratigraphic model. SPE Gas & Oil Technology Showcase and Conference (October 21–23, 2019 Dubai, UAE). Article number SPE-198622-MS. <https://doi.org/10.2118/198622-MS>
26. Farouk S., Sen S., Pigott J. D., Sarhan M. A. 2022, Reservoir characterization of the middle Miocene Kareem sandstones, Southern Gulf of Suez Basin, Egypt. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, vol. 8, no. 5, pp. 1–17. <https://doi.org/10.1007/s40948-022-00437-8>
27. Embabi A. M., Abdelwahhab M. A., Abdelhafez N. A. 2021, Reservoir characterization and petroleum geology at esh el Mallaha field, southern Gulf of Suez, Egypt. *Al-Azhar Bulletin of Science*, vol. 32, no. 2, pp. 1–12. <https://doi.org/10.21608/absb.2021.89127.1130>
28. Hadad Y. T., Hakimi M. H., Abdullah W. H., Kinawy M., El Mahdy O., Lashin A. 2021, Organic geochemical characteristics of Zeit source rock from Red Sea Basin and their contribution to organic matter enrichment and hydrocarbon generation potential. *Journal of African Earth Sciences*, vol. 177, article number 104151. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2021.104151>
29. 2017, The geology of Egypt: Regional Geology Reviews. R. Said (ed.), 734 p. <https://doi.org/10.1201/9780203736678>
30. Almalki K. A., Mahmud S. A. 2018, Gulfs of Suez and Aqaba: New insights from recent satellite-marine potential field data. *Journal of African Earth Sciences*, vol. 137, pp. 116–132. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2017.10.004>
31. El Gammal R. M. H., Orabi H. 2019, Coniacian-late Campanian Planktonic Events in the Duwi Formation, Red Sea region, Egypt. *Journal of Geology & Geophysics*, vol. 8, issue 1, pp. 1–16. <http://dx.doi.org/10.4172/2381-8719.1000456>
32. 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 Sciences*, vol. 136, pp. 10–21. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2017.06.001>
33. Afifi A. S., Moustafa A. R., Helmy H. M. 2016, Fault block rotation and footwall erosion in the southern Suez rift: Implications for hydrocarbon exploration. *Marine and Petroleum Geology*, vol. 76, pp. 377–396. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2016.05.029>
34. Youssef M., El-Sorogy A., El-Sabrouty M., Al-Otaibi H. 2016, Invertebrate shells as pollution bio-indicators, Gebel El-Zeit area, Gulf of Suez, Egypt. *Indian Journal of Geo-Marine Sciences*, vol. 45, no. 5, pp. 687–695.
35. 2016, Ministry of Petroleum and Mineral Resources. Ganoub El-Wadi Petroleum Holding Company “Ganope”. International Bid Round 2016, pp. 1–7.
36. South H. et al. The Source for Critical information and insight. Global Exploration & production service, Gulf of Suez south, Egypt. Status of Carto Data and IRIS21 databases. 2009.
37. Aboud E., Salem A., Ushijima K. 2005, Subsurface structural mapping of Gebel El-Zeit area, Gulf of Suez, Egypt using aeromagnetic data. *Earth, Planets and Space*, vol. 57, pp. 755–760. <http://dx.doi.org/10.1186/BF03351854>

The article was received on August 09, 2023

Многоступенчатая схема 3D-гравитационной инверсии для максимальной оптимизации модели подземного фундамента в бассейне Гебель-эль-Зейт, юго-западная часть Суэцкого залива, Египет

Ахмед Гамаль Мохамед ХАССАН^{1,2}
Карам Самир Ибрагим ФАРАГ³
Алаа Ахмед Фахми АРЕФ²
Алексей Лазаревич ПИСКАРЕВ¹

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

²Управление по ядерным материалам (УЯМ), Каир, Египет

³Университет Айн-Шамс, Каир, Египет

Аннотация

Актуальность и цель работы. Благодаря блоковой структуре фундамента в осадочном бассейне, юго-западная часть Суэцкого залива в бассейне Гебель-эль-Зейт является одним из самых привлекательных углеводородных горных отводов Египта. Однако соляные покровы в осадочных слоях затрудняют интерпретацию сейсмических данных в этом районе, что осложняет построение трехмерной первичной структуры центрального бассейна. В этом исследовании гравитационные аномалии Буге используются для ввода предположений модели сложной латеральной плотности фундамента для определения оптимальной трехмерной глубины фундамента для исследуемой территории.

Методология исследования. Основываясь на концепции последовательных подходов к трехмерной спектральной инверсии слоистой среды, посредством испытаний с Ольденбургской и другими прямыми моделями, многие стратегии прямой оптимизации и последовательности параметризации с предположениями о переменных ограничениях использовались для регулирования операций инверсии в рамках предложенной трехэтапной схемы гравитационной инверсии для определения оптимального решения по глубине и плотности с минимальным несоответствием расчетных данных. В этом исследовании статистически анализируется рельеф фундамента и сложное распределение плотности по латерали, чтобы определить наилучшие параметры для создания трехмерной модели глубины и плотности. Нулевые региональное значение силы тяжести и регулярная погрешка, которые привели к тому, что средняя ошибка была равна нулю, помогли смоделировать наилучшие возможные ограничивающие предположения модели боковой плотности.

Результаты и выводы. Корреляционные данные по глубинам многих стратиграфически-контрольных скважин, пробуренных на инверсивной 3D-модели фундамента, подтвердили оптимальность рельефа фундамента изучаемой территории. Корреляционный анализ показал хорошее соответствие между прогнозируемыми и измеренными глубинами, доказав полученную оптимальность латерального распределения плотности фундаментного комплекса, минимизируя ошибку расчета глубины до минимального процента.

Ключевые слова: Египет, Суэцкий залив, район бассейна Эль-Зейт, аномалии Буге, схема спектрально-слоистой гравитационной инверсии, параметризация и оптимизация.

Исследования Ахмеда Г. М. Хасана финансируются за счет стипендии [EGY-6958/16] в рамках совместной (исполнительной) программы между Арабской Республикой Египет и Россией.

REFERENCES

- Jessell M. et al. Next Generation Three-Dimensional Geologic Modeling and Inversion. Building Exploration Capability for the 21st Century. Chapter 13. Karen D. Kelley and Howard C. Golden (eds). Littleton, Colorado, USA: Society of Economic Geologists, 2014. P. 261–272. <https://doi.org/10.5382/SP.18.13>
- Fan D., Li S., Li X., Yang J., Wan X. Seafloor Topography Estimation from Gravity Anomaly and Vertical Gravity Gradient Using Nonlinear Iterative Least Square Method // Remote Sensing. 2021. Vol. 13. Pp. 1–19. <https://doi.org/10.3390/rs13010064>
- Silva J. B. C., Santos D. F., Gomes K. P. Fast gravity inversion of basement relief // Geophysics. 2014. Vol. 79. No. 5. Pp. G79–G91. <https://doi.org/10.1190/geo2014-0024.1>
- Pham L. T., Oksum E., Do T. D. GCH_gravinv: A MATLAB-based program for inverting gravity anomalies over sedimentary basins // Computers & Geosciences. 2018. Vol. 120. P. 40–47. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2018.07.009>
- Cremon M., Burnham A. K., Liu Y., Lapene A. Modified Athy-Law Compaction to Account for Porosity Generation and Preservation from Kerogen Conversion in Terzaghi-Like Models of Petroleum Source Rocks // AAPG Annual Convention and Exhibition. 2017. Article number 42062. P. 1–18.

✉ahmed.gamal_88@hotmail.com

6. Wu L. Efficient Modeling of Gravity Fields Caused by Sources with Arbitrary Geometry and Arbitrary Density Distribution // *Surveys in Geophysics*. 2018. Vol. 39. Issue 3. P. 401–434. <https://doi.org/10.1007/s10712-018-9461-7>
7. Santos D. F., Silva J. B. C., Martins C. M., Santos R. C. S., Ramos L. C., de Araújo A. C. M. Efficient gravity inversion of discontinuous basement relief // *Geophysics*. 2015. Vol. 80. No. 4. P. G95–G106. <https://doi.org/10.1190/geo2014-0513.1>
8. Preston L., Poppeliers C., Schodt D. J. Seismic Characterization of the Nevada National Security Site Using Joint Body Wave, Surface Wave, and Gravity Inversion // *Bulletin of The Seismological Society of America*. 2020. Vol. 110. No. 1. P. 110–126. <http://dx.doi.org/10.1785/0120190151>
9. Wu L. Fourier-domain modeling of gravity effects caused by polyhedral bodies // *Journal Of Geodesy*. 2019. Vol. 93. Issue 5. P. 635–653. <http://dx.doi.org/10.1007/s00190-018-1187-2>
10. Mallesh K., Chakravarthi V., Ramamma B. 3D Gravity Analysis in the Spatial Domain: Model Simulation by Multiple Polygonal Cross-Sections Coupled with Exponential Density Contrast // *Pure And Applied Geophysics*. 2019. Vol. 176. Issue 6. Pp. 2497–2511. <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02103-9>
11. Wu L. Efficient modelling of gravity effects due to topographic masses using the Gauss–FFT method // *Geophysical Journal International*. 2016. Vol. 205. Issue 1. P. 160–178. <https://doi.org/10.1093/gji/ggw010>
12. Wu L., Lin Q. Improved Parker's method for topographic models using Chebyshev series and low rank approximation // *Geophysical Journal International*. 2017. Vol. 209. Issue 2. P. 1296–1325. <https://doi.org/10.1093/gji/ggx093>
13. Stolk W., Kaban M., Beekman F., Tesaura M., Mooney W. D., Cloetingh S. 2013, High resolution regional crustal models from irregularly distributed data: Application to Asia and adjacent areas // *Tectonophysics*. Vol. 602. No. 6. P. 55–68. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.01.022>
14. Buccini A. Tikhonov-type iterative regularization methods for ill-posed inverse problems: theoretical aspects and applications: PhD thesis. Varese, Italy: Università degli Studi dell'Insubria, 2016.
15. Dadak B. Inversion of gravity data for depth-to-basement estimate using the volume and surface integral methods: model and case study. Salt Lake City, UT, USA: The University of Utah, May, 2017. 92 p.
16. Maag E., Li Y. Discrete-valued gravity inversion using the guided fuzzy c-means clustering technique // *Geophysics*. 2018. Vol. 83. Issue 4. P. 1–115. <http://dx.doi.org/10.1190/geo2017-0594.1>
17. Feng X., Wang W., Yuan B. 3D gravity inversion of basement relief for a rift basin based on combined multinorm and normalized vertical derivative of the total horizontal derivative techniques // *Geophysics*. 2018. Vol. 83. Issue 5. P. G107–G118. <https://doi.org/10.1190/geo2017-0678.1>
18. Cella F., Nappi R., Paoletti V., Florio G. Basement Mapping of the Fucino Basin in Central Italy by ITRESC Modeling of Gravity Data // *Geosciences*. 2021. Vol. 11. No. 10. P. 1–25. <https://doi.org/10.3390/geosciences11100398>
19. Ren Z., Chen C., Pan K., Kalscheuer T., Maurer H., Tang J. Gravity Anomalies of Arbitrary 3D Polyhedral Bodies with Horizontal and Vertical Mass Contrasts // *Surveys In Geophysics*. 2017. Vol. 38. No. 2. P. 479–502. <https://doi.org/10.1007/s10712-016-9395-x>
20. Vatankhah S., Renaut R. A., Huang X., Mickus K., Gharloghi M. Large-scale focusing joint inversion of gravity and magnetic data with Gramian constraint // *Geophysical Journal International*. 2022. Vol. 230. Issue 3. P. 1585–1611. <https://doi.org/10.1093/gji/ggac138>
21. Makled W. A., Ashwah A. A. E. E., Lotfy M. M., Hegazey R. M. Anatomy of the organic carbon related to the Miocene syn-rift dysoxia of the Rudeis Formation based on foraminiferal indicators and palynofacies analysis in the Gulf of Suez, Egypt // *Marine and Petroleum Geology*. 2020. Vol. 111. P. 695–719. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2019.08.048>
22. Abuzied S. M., Kaiser M. F., Shendi E.-A. H., Abdel-Fattah M. I. Multi-criteria decision support for geothermal resources exploration based on remote sensing, GIS and geophysical techniques along the Gulf of Suez coastal area, Egypt // *Geothermics*. 2020. Vol. 88. Article number 101893. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2020.101893>
23. The Geology of the Arab World – An Overview. Bendaoud A., Hamimi Z., Hamoudi M., Djemai S., Zoheir B. (eds). Berlin: Springer, 2019. 560 p.
24. Temraz M., Dypvik H. The Lower Miocene Nukhul Formation (Gulf of Suez, Egypt): microfacies and reservoir characteristics // *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. 2018. Vol. 8. No. 1. P. 85–98. <https://doi.org/10.1007/s13202-017-0386-3>
25. Van Dijk J., AIBloushi A., Ajayi A. T., De Vincenzi L., Ellen H., Guney H., Holloway P., Khadhaouria M., Mcleod I. S. Hydrocarbon exploration and production potential of the Gulf of Suez Basin in the framework of the new tectonostratigraphic model. SPE Gas & Oil Technology Showcase and Conference (October 21–23, 2019 Dubai, UAE). 2019. Article number SPE-198622-MS. <https://doi.org/10.2118/198622-MS>
26. Farouk S., Sen S., Pigott J. D., Sarhan M. A. Reservoir characterization of the middle Miocene Kareem sandstones, Southern Gulf of Suez Basin, Egypt // *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*. 2022. Vol. 8. No. 5. P. 1–17. <https://doi.org/10.1007/s40948-022-00437-8>
27. Embabi A. M., Abdelwahhab M. A., Abdelhafez N. A. Reservoir characterization and petroleum geology at esh el Mallaha field, southern Gulf of Suez, Egypt // *Al-Azhar Bulletin of Science*. 2021. Vol. 32. No. 2. P. 1–12. <https://doi.org/10.21608/absb.2021.89127.1130>
28. Hadad Y. T., Hakimi M. H., Abdullah W. H., Kinawy M., El Mahdy O., Lashin A. Organic geochemical characteristics of Zeit source rock from Red Sea Basin and their contribution to organic matter enrichment and hydrocarbon generation potential // *Journal of African Earth Sciences*. 2021. Vol. 177. Article number 104151. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2021.104151>
29. The geology of Egypt: Regional Geology Reviews. R. Said (ed.), 2017. 734 p. <https://doi.org/10.1201/9780203736678>
30. Almalki K. A., Mahmud S. A. Gulfs of Suez and Aqaba: New insights from recent satellite-marine potential field data // *Journal of African Earth Sciences*. 2018. Vol. 137. P. 116–132. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2017.10.004>
31. El Gammal R. M. H., Orabi H. Coniacian-late Campanian Planktonic Events in the Duwi Formation, Red Sea region, Egypt // *Journal of Geology & Geophysics*. 2019. Vol. 8. Issue 1. P. 1–16. <http://dx.doi.org/10.4172/2381-8719.1000456>
32. Attia I., Helal I., El Dakhkhny A., Aly S. A. Using sequence stratigraphic approaches in a highly tectonic area: Case study – Nubia (A) sandstone in southwestern Gulf of Suez, Egypt // *Journal of African Earth Sciences*. 2017. Vol. 136. P. 10–21. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2017.06.001>
33. Affi A. S., Moustafa A. R., Helmy H. M. Fault block rotation and footwall erosion in the southern Suez rift: Implications for hydrocarbon exploration // *Marine and Petroleum Geology*. 2016. Vol. 76. P. 377–396. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2016.05.029>
34. Youssef M., El-Sorogy A., El-Sabrouty M., Al-Otaibi H. Invertebrate shells as pollution bio-indicators, Gebel El-Zeit area, Gulf of Suez, Egypt // *Indian Journal of Geo-Marine Sciences*. 2016. Vol. 45. No. 5. P. 687–695.
35. Ministry of Petroleum and Mineral Resources. Ganoub El-Wadi Petroleum Holding Company “Ganope”. International Bid Round 2016. 2016. P. 1–7.
36. South H. et al. The Source for Critical information and insight. Global Exploration & production service, Gulf of Suez south, Egypt. Status of Carto Data and IRIS21 databases. 2009.
37. Aboud E., Salem A., Ushijima K. Subsurface structural mapping of Gebel El-Zeit area, Gulf of Suez, Egypt using aeromagnetic data // *Earth, Planets and Space*. 2005. Vol. 57. P. 755–760. <http://dx.doi.org/10.1186/BF03351854>

Статья поступила в редакцию 09 августа 2023 года

Xenotime-(Y) from granitic pegmatites of the Monatsitovaya mine, Aduisky massif, Middle Urals (chemical composition and age)

Vera Vital'evna KHILLER*
Yuriy Viktorovich EROKHIN**

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

Abstract

The relevance of the work is due to the need to improve the chemical dating method as applied to high-uranium and high-thorium accessory minerals, which are difficult to study using isotopic research methods.

The purpose of the work is to study the chemical composition of accessory xenotime from granite pegmatites of the Monatsitovaya mine (western part of the Aduisky massif) and determine its age.

Research methodology. A quantitative analysis of the chemical composition of monazite was performed on a CAMECA SX 100 electron probe microanalyzer (IGG Ural Branch RAS, Ekaterinburg). Measurement conditions: accelerating voltage 15 kV, current 250 nA, electron beam diameter 2 μm . The pressure in the sample chamber is 2×10^{-4} Pa. The spectra were obtained on inclined wave spectrometers, the intensity measurements were carried out along the analytical lines: Y $L\alpha$, Si $K\alpha$, (TAP crystal analyzer), U $M\beta$, Pb $M\alpha$, Ca $K\alpha$, Th $M\alpha$, P $K\alpha$ (PET), Yb $L\alpha$, Dy $L\alpha$, Er $L\alpha$, Gd $L\alpha$, Lu $L\alpha$, Sm $L\beta$ (LiF). The overlap of peaks of spectral lines was taken into account, which is extremely important in the quantitative determination of lead content (the Y $L\gamma_{2,3}$ и Th $M\zeta_{1,2}$ lines are superimposed on the analytical Pb $M\alpha$ line). The pulse accumulation time at the peaks of analytical lines was twice as long as for the background and was 60 s for Th, 40 s for U and Pb, and 10 s for other elements. When conducting research, linear experimental design was used to vary the time of measuring the intensities of the $M\beta$ line of uranium, $M\alpha$ lines of thorium and lead. The calculated detection limits are 345 ppm for U, 283 ppm for Th, 65 ppm for Pb, 205 ppm for Y.

Results. It has been established that xenotime belongs to the yttrium variety and is characterized by an increased content of uranium (UO_2 up to 8.8 wt. %) and thorium (ThO_2 up to 4.5 wt. %). According to the results of chemical dating (based on 32 analyses), xenotime-(Y) shows a weighted average age of 276 ± 7 Ma (MSWD = 0.54). When constructing the dependence ($\text{ThO}_2 + \text{UO}_2^{\text{eq}}$) – PbO, the points fall on one isochron. Calculating the age using the isochron slope angle gave a dating of 276 ± 12 million years (MSWD = 0.94).

Conclusions. The obtained age values for the xenotime are in good agreement with the dating of the pegmatoid granites of the Krutikhinsky massif, which is located on the western contact of the Aduisky granite massif and relatively close to the Monatsitovaya mine. It is quite possible that some pegmatites in the western part of the Aduisky massif were formed as a result of the formation of the Krutikhinsky massif.

Keywords: xenotime-(Y), chemical dating, granite pegmatites, Monatsitovaya mine, Aduisky massif, Middle Urals.

Introduction

The method of chemical U–Th–Pb dating has been known for quite a long time; abroad it is often used as a rapid non-isotopic method for determining the age of accessory U–Th-containing minerals with a size of at least 5–10 microns. This method is of interest to geologists for its simplicity in sample preparation, high speed, low cost of analysis, and good agreement with isotope dating. It is mainly applied to monazite, which is more widespread in nature, and only in rare cases to other radioactive minerals [1, 2]. In this case, it is most difficult to date yttrium phosphate – xenotime, since serious difficulties arise in determining lead using the Ma -line due to spectral overlap with the yttrium line [3–5]. In [6], the effect of superposition of the Y $L\gamma$ -line on the Pb Ma -line was analyzed on synthetic YPO_4 ; extrapolation to the yttrium content in monazite of the order of 2 wt. % shows that the superposition of lines in phos-

phates can lead to an overestimation of the lead content by a maximum of 30 ppm, which in turn leads to an increase in the calculated age. This paper presents the results of a study of accessory xenotime from granite pegmatites of the Monatsitovaya mine, located in the western part of the Aduisky massif.

Geological position and structure of the Monatsitovaya mine in the Aduisky massif. In recent years, a number of new pegmatite mines have been discovered in the Aduisky granite massif [7]. A large number of them were found 6–7 km north of the village of Ozernoye (located south of the city of Rezh) and in its vicinity [8]. This area is rich in ceramic pegmatite mines, in the largest of which at the beginning of the last century (1925–1927) prospectors mined feldspar for the ceramic industry. Lump feldspar was mined from the upper fractured parts of the mines to a depth of 2–3 m in workings up to 4–30

✉ hilvervit@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-8491-4958>

**erokhin-yu@yandex.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-0577-5898>

m long and transported on carts to the river and then to the Rezh station. In total, about 1000 tons of feldspar were mined [9].

The Monatsitovaya mine is located on the northwestern edge of the Chistoye swamp, approximately 4 km southwest of the village of Ozernoye and 5 km west of the Kostousovo railway station (Fig. 1). The reference from the GPS navigator is N 57°17'34.2'', E 61°08'96.6''. In 1971 V. A. Gubin (now deceased) found large monazite crystals, up to 1.5 cm in size, in an unnamed pegmatite mine quarter 62 of Monetnaya Dacha [7]. Based on this find, the mine was named Monatsitovaya.

The pegmatite mine reaches a length of 30–35 m with a thickness of 2–4 m, a strike azimuth of 65°, and a dip angle of 70–85°. Zoning from the salvages to the center: pegmatoid quartz-feldspar zone with annite and magnetite – graphic zone of quartz-feldspar composition with annite, muscovite and REE mineralization – block quartz-feldspar zone with muscovite and REE mineralization. In pegmatite, xenotime is yttrium and occurs in the graphic and block zones, where it associates with annite, muscovite, monazite-(Ce), ilmenite, ilmenorutile, magnetite, thorianite, fluorapatite and zircon. It forms large bipyramidal crystals, up to 1 cm in size, often with internal zoning from bluish-green in the center through reddish-brown in the middle to greenish-yellow at the edges [7, 11].

Research methodology

A quantitative analysis of the chemical composition of xenotime was performed on a CAMECA SX 100 electron probe microanalyzer (IGG Ural Branch RAS, Yekaterinburg). A polished section was made from a xenotime crystal, up to 1 cm in size, then the specimen was sprayed with a thin layer of carbon. Measurement conditions: accelerating voltage 15 kV, current 250 nA, electron beam diameter 2 μm . The pressure in the sample chamber is 2×10^{-4} Pa. Before performing a quantitative analysis, the intensity distribution maps of the characteristic X-ray radiation in the rays of the analytical lines were recorded. Standard samples of synthetic REE phosphates, Th and U oxides, pyrope, and $\text{Pb}_2\text{P}_2\text{O}_7$ were used as standards. To measure the intensity, the following analytical lines were selected: Y $L\alpha$, Si $K\alpha$, (TAP analyzer crystal), U $M\beta$, Pb $M\alpha$, Ca $K\alpha$, Th $M\alpha$, P $K\alpha$ (PET), Yb $L\alpha$, Dy $L\alpha$, Er $L\alpha$, Gd $L\alpha$, Lu $L\alpha$, Sm $L\beta$ (LiF). The overlap of peaks of spectral lines was taken into account, which is extremely important in the quantitative determination of lead content (the Y $L\gamma_{2,3}$ и Th $M\zeta_{1,2}$ lines are superimposed on the analytical Pb $M\alpha$ line). The time for collecting pulses at the peaks of analytical lines was twice as long as for the background and was 60 s for Th, 40 s for U and Pb, and 10 s for the other elements. When conducting research, linear experimental design was used to vary the time of measuring the intensities of the $M\beta$ line of uranium, $M\alpha$ lines of thorium and lead. The calculated detection limits are 345 ppm for U, 283 ppm for Th, 65 ppm for Pb, 205 ppm for Y. Oxygen content was determined assuming compositional stoichiometry. The theoretical and practical justification for the method of chemical dating using X-ray spectral microprobe analysis is given in numerous publications on this topic [6, 12], including the team of authors [2, 13]. The main condition of this method: during the process of evolution, the mineral did not lose radiogenic lead (i. e., the Th–U–Pb system was closed), all the lead in the mineral was formed due to the decay of thorium and uranium.

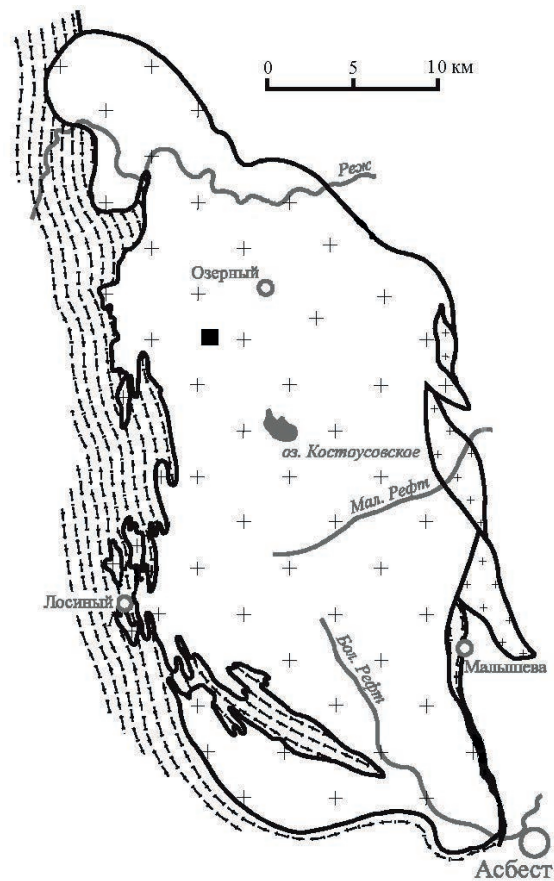


Figure 1. Contours of the Aduisky granite massif with settlements and reservoirs (given according to [10] with our simplifications). The square shows the location of the Monatsitovaya mine
 Рисунок 1. Контуры Адуйского гранитного массива с вынесенными населенными пунктами и водоемами (дано по [10] с нашими упрощениями). Квадратом показано расположение копи «Монацитовая»

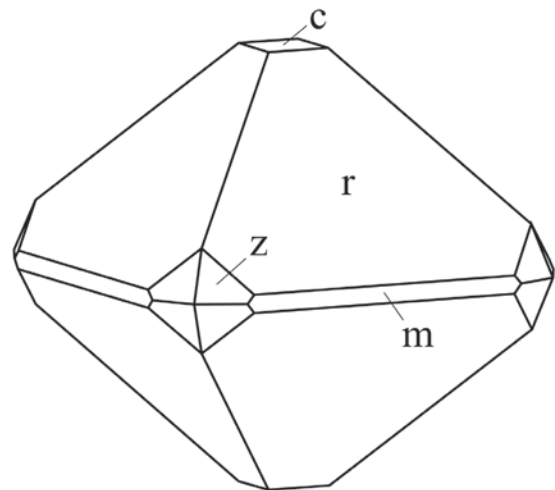


Figure 2. Idealized xenotime crystal. Face indices are given in the text
 Рисунок 2. Идеализированный кристалл ксенотима. Индексы граней даны в тексте

Results and discussion

For study and dating, we used a relatively large and opaque xenotime crystal from the block zone. It was kindly donated for

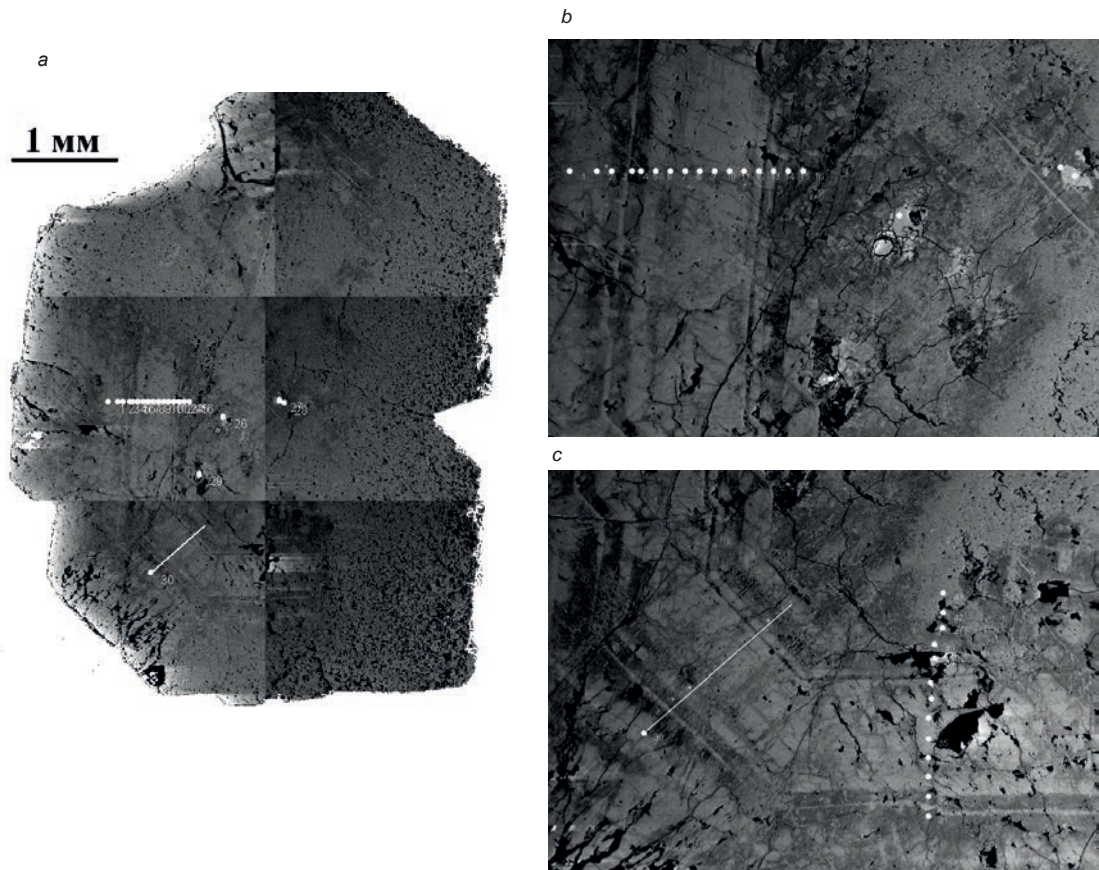


Figure 3. Image of a xenotime crystal and its fragments from the Monatsitovaya mine: *a* – general view of the cross section of the crystal, *b* – fragment of the central part of the crystal, *c* – fragment of the lower part of the crystal. BSE photo, CAMECA SX 100. A photo of an individual is made by gluing together smaller pictures. The dots and line show the analyzes and profile
Рисунок 3. Изображение кристалла ксенотима и его фрагментов из жилы «Монацитовая»: *a* – общий вид сечения кристалла, *b* – фрагмент центральной части кристалла, *c* – фрагмент нижней части кристалла. BSE-фото, CAMECA SX 100. Фото индивида сделано путем склеивания более мелких картинок. Точками и линией показаны анализы и профиль

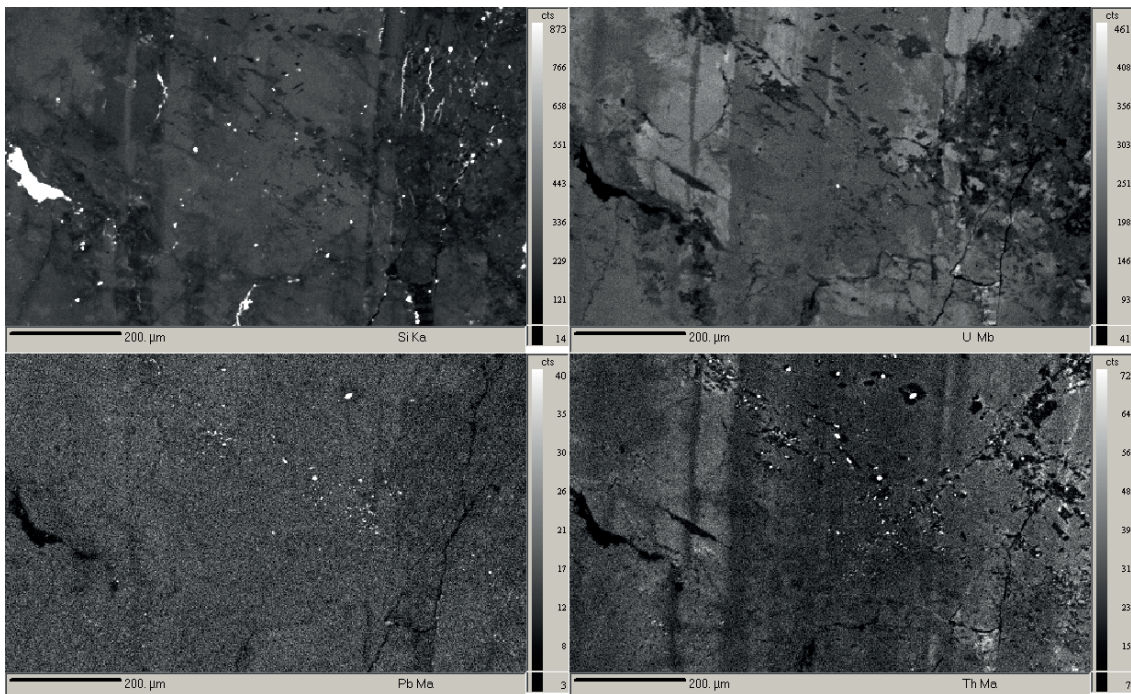


Figure 4. BSE image of the central section of a xenotime crystal, 950 × 580 μm in size, in characteristic X-ray radiation of the Si Ka, U Mb, Pb Ma and Th Ma lines. The intensity reading step is 2 μm, the measurement time at a point is 50 ms
Рисунок 4. BSE-изображение центрального участка кристалла ксенотима размером 950 × 580 мкм в характеристическом рентгеновском излучении линий Si Ka, U Mb, Pb Ma и Th Ma. Шаг считывания интенсивности – 2 мкм, время измерения в точке – 50 мс

Table 1. Chemical composition of xenotime from pegmatites of the Monatsitovaya mine, wt. %
Таблица 1. Химический состав ксенотима из пегматитов жилы «Монацитовая», мас. %

Oxides	Analysis number										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
P ₂ O ₅	29,12	29,46	30,16	29,00	29,02	29,81	29,77	29,36	29,02	27,67	29,58
ThO ₂	3,17	3,18	3,02	4,28	3,30	3,18	3,07	3,53	3,90	3,60	4,39
UO ₂	6,22	6,32	6,34	7,97	7,85	6,22	6,31	6,47	6,54	8,81	3,75
SiO ₂	1,99	1,81	1,97	1,46	1,90	2,14	2,22	1,83	1,87	1,78	1,35
Y ₂ O ₃	37,07	36,37	36,80	33,57	35,66	37,45	37,60	36,12	35,82	34,31	35,96
Lu ₂ O ₃	0,58	0,64	0,61	0,69	0,48	0,42	0,51	0,45	0,35	0,42	0,61
Yb ₂ O ₃	4,59	4,39	4,68	4,61	4,51	4,41	4,52	4,51	4,62	4,26	4,36
Tm ₂ O ₃	0,73	0,70	0,72	0,74	0,66	0,74	0,66	0,59	0,71	0,64	0,64
Er ₂ O ₃	3,95	3,96	3,98	3,86	3,85	3,90	3,93	3,91	3,97	3,67	3,77
Ho ₂ O ₃	0,88	0,98	0,79	0,83	0,87	0,85	0,86	0,85	0,73	0,73	0,89
Dy ₂ O ₃	4,18	4,13	4,24	4,10	4,09	4,29	4,32	4,24	4,27	3,98	4,06
Gd ₂ O ₃	1,71	1,68	1,64	1,64	1,63	1,75	1,73	1,75	1,70	1,66	1,65
Sm ₂ O ₃	0,46	0,43	0,45	0,47	0,47	0,43	0,46	0,30	0,36	0,40	0,50
Nd ₂ O ₃	0,37	0,36	0,40	0,37	0,29	0,44	0,39	0,45	0,36	0,35	0,37
PbO	0,30	0,27	0,26	0,25	0,37	0,26	0,30	0,29	0,25	0,35	0,18
CaO	0,38	0,50	0,26	1,21	0,66	0,06	0,05	0,59	0,60	1,06	1,07
<i>Total</i>	95,71	95,17	96,32	95,04	95,61	96,36	96,71	95,23	95,05	93,69	93,15

Oxides	Analysis number										
	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
P ₂ O ₅	28,30	28,23	28,41	29,25	29,00	27,93	28,37	29,76	26,50	30,00	29,39
ThO ₂	4,29	4,39	4,37	3,06	3,26	4,18	4,52	3,08	6,06	3,00	2,86
UO ₂	8,02	8,32	8,27	5,80	6,47	7,39	7,44	5,98	6,97	6,06	5,87
SiO ₂	2,93	2,97	2,96	1,89	1,86	1,62	1,62	1,93	1,07	1,93	2,05
Y ₂ O ₃	35,73	35,83	35,65	36,51	36,27	33,80	33,23	37,02	34,06	36,61	37,67
Lu ₂ O ₃	0,51	0,56	0,55	0,68	0,60	0,63	0,68	0,60	0,61	0,61	0,62
Yb ₂ O ₃	4,13	4,28	4,25	4,61	4,45	4,37	4,50	4,59	4,69	4,58	4,61
Tm ₂ O ₃	0,70	0,69	0,60	0,63	0,71	0,70	0,67	0,73	0,88	0,75	0,67
Er ₂ O ₃	3,76	3,76	3,79	3,93	3,92	3,91	3,82	3,87	4,75	3,96	4,04
Ho ₂ O ₃	0,81	0,71	0,73	0,74	0,76	0,75	0,81	0,84	1,09	0,96	0,90
Dy ₂ O ₃	3,95	4,11	4,06	4,07	4,10	4,03	3,94	4,22	4,07	4,20	4,14
Gd ₂ O ₃	1,62	1,68	1,65	1,65	1,63	1,61	1,65	1,65	1,96	1,70	1,67
Sm ₂ O ₃	0,41	0,38	0,39	0,31	0,39	0,43	0,40	0,45	0,62	0,40	0,36
Nd ₂ O ₃	0,41	0,38	0,42	0,28	0,33	0,39	0,36	0,36	0,30	0,27	0,31
PbO	0,36	0,35	0,38	0,25	0,29	0,26	0,20	0,28	0,25	0,26	0,27
CaO	0,05	0,05	0,05	0,57	0,55	1,28	1,42	0,52	1,12	0,23	0,14
<i>Total</i>	96,01	96,68	96,54	94,24	94,59	93,29	93,63	95,86	95,01	95,52	95,56

Oxides	Analysis number										
	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	
P ₂ O ₅	30,64	30,06	28,76	29,04	29,86	28,91	30,04	29,53	29,77	27,97	
ThO ₂	3,68	2,66	3,58	3,45	3,10	3,39	3,31	3,16	3,12	4,02	
UO ₂	6,16	5,64	8,07	7,36	6,33	6,84	7,78	6,50	6,62	6,80	
SiO ₂	1,60	2,03	1,68	1,81	2,02	1,81	1,87	2,09	2,20	1,64	
Y ₂ O ₃	36,07	37,92	34,84	35,46	36,48	35,77	34,43	36,70	36,72	35,02	
Lu ₂ O ₃	0,56	0,57	0,65	0,61	0,63	0,62	0,61	0,64	0,58	0,55	
Yb ₂ O ₃	4,62	4,57	4,46	4,39	4,46	4,42	4,36	4,46	4,35	4,51	
Tm ₂ O ₃	0,69	0,67	0,71	0,63	0,69	0,68	0,73	0,65	0,80	0,72	
Er ₂ O ₃	3,90	3,96	3,88	3,81	3,92	3,93	3,77	3,86	3,85	3,97	
Ho ₂ O ₃	0,90	0,80	0,84	0,92	0,88	0,92	0,78	0,86	0,83	0,86	
Dy ₂ O ₃	4,26	4,20	4,05	4,16	4,16	4,12	4,02	4,21	4,17	4,19	
Gd ₂ O ₃	1,66	1,66	1,73	1,64	1,71	1,68	1,67	1,74	1,68	1,77	
Sm ₂ O ₃	0,45	0,40	0,42	0,31	0,39	0,41	0,44	0,39	0,39	0,47	
Nd ₂ O ₃	0,37	0,34	0,39	0,28	0,40	0,37	0,38	0,35	0,32	0,48	
PbO	0,30	0,27	0,31	0,32	0,29	0,36	0,30	0,31	0,33	0,29	
CaO	0,82	0,06	0,92	0,65	0,22	0,69	0,58	0,22	0,13	0,78	
<i>Total</i>	96,69	95,83	95,29	94,84	95,55	94,91	95,05	95,66	95,85	94,05	

Note: IGG Ural Branch of RAS, microanalyzer CAMECA SX 100, analyst V. V. Khiller.

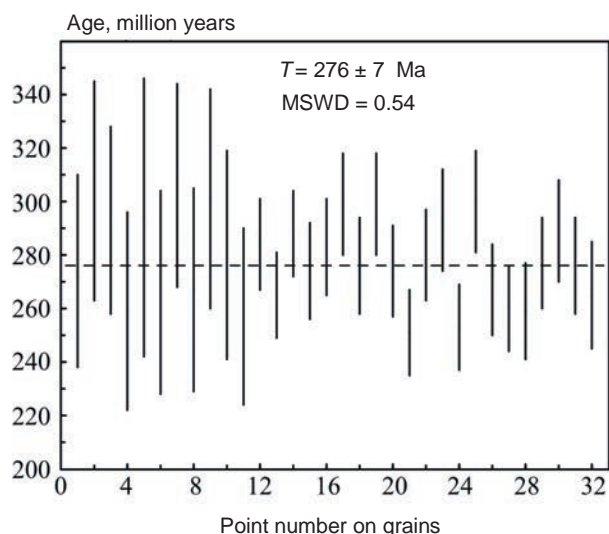


Figure 5. Average weighted Th–U–Pb age of xenotime according to microprobe analyzes (a total of 32 determinations were made)
Рисунок 5. Средневзвешенный Th–U–Pb-возраст ксенотима по данным микрозондовых анализов (всего сделано 32 определения)

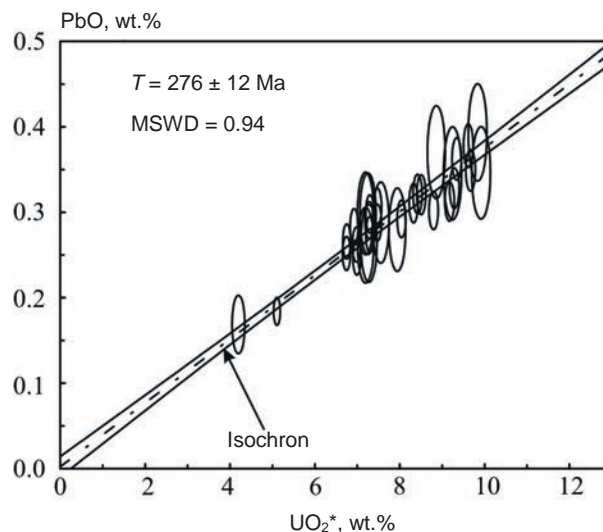


Figure 6. UO_2^* –PbO data for xenotime from the Monatsitovaya mine. The ellipses correspond to the error values 1 s, the dashed line is a regression line with two symmetrical hyperbolas that fix the errors
Рисунок 6. UO_2^* –PbO-данные для ксенотима из жилы «Монацитовая». Эллипсы соответствуют значениям погрешности 1 s, штрихпунктир – линия регрессии с двумя симметричными гиперболами, фиксирующими погрешности

research by V. A. Gubin. Xenotime is characterized by a dark brown color and has small epitaxial growths of zircon at the tops of the crystal. An individual xenotime is bipyramidal in appearance (Fig. 2), up to 1 cm in diameter, slightly flattened along the $c[001]$ axis. The main shape in the cut of the crystal is a dipyrmaid – $r\{111\}$, narrow prism edges are marked on its edges – $m\{110\}$, and the vertices are cut by a basopinacoid – $c\{001\}$ and a ditetragonal dipyrmaid – $z\{311\}$. The surface of the edges is matte, uneven in places.

Due to the wide range of uranium, thorium and heavy REE contents, individual xenotime from the Monatsitovaya mine is characterized by clearly defined zoning in backscattered electron images (Fig. 3). The matrix contains small inclusions of uranium and thorium phases, uraninite and thorianite, no more than 50 microns in size (Fig. 4).

The chemical composition of the studied xenotime is quite heterogeneous (Table 1) and correlates well with previously obtained data [11], which, unfortunately, were few. Based on our results of all the above 32 analyses, we can say that phosphate in the block zone is represented by yttrium variety (since yttrium significantly predominates over heavy rare earths) with a fairly high content of uranium (UO_2 up to 8.8 wt. %) and thorium (ThO_2 up to 4.5 wt. %). Among other impurities, one can note the presence of significant concentrations of erbium (Er_2O_3 up to 5.5 wt. %), ytterbium (Yb_2O_3 up to 5.3 wt. %), calcium (CaO up to 4.0 wt. %) and silica (SiO_2 up to 2.9 wt. %). The content of radiogenic components varies quite strongly, wt. %: ThO_2 – 2.57–6.06; UO_2 – 1.94–8.81; PbO – 0.08–0.41. The sums of the analyzes indicate that xenotime may contain water, although some elements may not have been measured.

For each point of the crystal at which the analysis was carried out (about 32 points in total), the age was calculated using the method of [6], the scatter of which is in the range from 251 to 306 million years. Their weighted average is 276 ± 7 Ma, $MSWD = 0.54$ (Fig. 5).

Thanks to the wide range of contents of uranium and lead oxides, we were able to construct an isochron from a set of analytical points using the CHIME method [5] in UO_2^* –PbO coordinates, and from its slope angle ($m = 0.0373$) we calculated the U^*/Pb age, which was 276 ± 12 Ma (Fig. 6). Here $UO_2^* = (UO_2 + ThO_2^{eq})$, where ThO_2^{eq} is the thorium content, converted into the equivalent uranium content, capable of producing the same amount of Pb during the lifetime of the system with equal U–Pb and Th–Pb age values. The content of non-radiogenic lead in the xenotime, calculated from the intersection of the U^* –Pb isochron with the PbO axis, is less than 0.005 wt. %, which is comparable to the limit of its detection in the mineral and therefore did not affect the age calculation.

The age values obtained for xenotime from granite pegmatites of the Monatsitovaya mine are quite difficult to estimate, since, according to existing ideas, the time of formation of the Aduisky granite massif covers a wide time interval and is estimated from 291 ± 8 million years (based on zircon [14]) to 256 ± 0.6 million years (according to monazite [15]) and 255–241 million years (according to micas [10]). Moreover, the most ancient rocks are recorded in the western part of the massif, and the youngest ones – in the central and eastern parts of the body. The pegmatites of the Aduisky massif mainly record two age boundaries: 268–262 and 255 million years. Moreover, the latter vein bodies are most often found in this area. Thus, in granitic pegmatites near the village of Ozernoye (northern part of the massif), accessory zircon was studied by chemical dating, the age of which was calculated to be within 255 ± 7 million years [16]. In nearby mines, a completely reliable Th–U–Pb dating was obtained for accessory monazites – 254 ± 15 Ma [17], and in the western part of the massif for monazite from the Semeninskaya mine – 256 ± 21 Ma [18]. Similar datings within the range of 255–241 million years were shown by micas (K–Ar method) from various Aduisky pegmatites [10].

More ancient pegmatites are characteristic of the eastern contact of the Aduisky massif. Thus, the age of granite pegmatites of the Kvartalny tantalum-niobium deposit, according to the bimineral uraninite-monzite isochron, is calculated to be within 268 ± 2 million years [19]. Rare-metal pegmatites from the nearby deposit of the same type Lipovy Log give a close dating – 262 ± 7 million years (according to the Re–Os age of molybdenites [20]), and granite pegmatites of the Lipovsky vein field located at the junction of the Aduisky and Murzinsky granite massifs – 266 ± 3 million years (according to the three-mineral isochron with uraninite, coffinite and monazite [2]).

The age values we obtained for xenotime can quite possibly be attributed to the last group of “ancient” pegmatites, because the existing error allows us to cover the entire interval of 268–262 million years. At the same time, the age of the xenotime is in good agreement with the dating of pegmatoid granites of the Krutikhinsky massif (272–271 million years, according to U–Pb data on accessory zircon [21]), which is

located on the western contact of the Aduisky granite massif and, relatively close to the Monatsitovaya mine (4–5 km south-west). It is likely that some pegmatites in the western part of the Aduisky massif were formed as a result of the formation of the Krutikhinsky massif.

Conclusions

Thus, we studied accessory xenotime from pegmatites of the Monatsitovaya mine, located in the western part of the Aduisky granite massif. According to microprobe analysis, xenotime belongs to the yttrium variety and is characterized by an increased content of uranium (UO_2 up to 8.8 wt. %) and thorium (ThO_2 up to 4.5 wt. %). An isochron age of 276 ± 12 Ma was calculated for it. The obtained age values for the xenotime are in good agreement with the dating of the pegmatoid granites of the Krutikhinsky massif, which is located on the western contact of the Aduisky granite massif and relatively close to the Monatsitovaya mine. It is quite possible that some pegmatites in the western part of the Aduisky massif were formed as a result of the formation of the Krutikhinsky massif.

The authors express their deep gratitude to Viktor Arkadyevich Gubin for providing the xenotime crystal and mourn his untimely death.

The work was carried out within the framework of the state assignment of the IGG, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, state no. reg. 123011800014-3.

REFERENCES

- Ivanov K. S., Erokhin Yu. V., Fedorov Yu. N., Khiller V. V., Ponomarev V. S. 2010, Isotope and chemical U–Pb dating of granitoids of the West Siberian megabasin. *Doklady Akademii nauk* [Reports of the Academy of Sciences], vol. 433, no. 5, pp. 671–674. (In Russ.)
- Khiller V. V., Erokhin Yu. V., Zakharov A. V., Ivanov K. S. 2014, Th–U–Pb dating of granite pegmatites of the Lipovsky ore field (Urals) using three minerals. *Doklady Akademii nauk* [Reports of the Academy of Sciences], vol. 455, no. 2, pp. 216–219. (In Russ.) <https://doi.org/10.7868/s0869565214080210>
- Korolyuk V. N., Nigmatulina E. N. 2013, Registration of the Ma-line of lead in rare earth phosphates using a microanalyzer JEOL JXA-8100. *Zhurnal analiticheskoy khimii* [Journal of Analytical Chemistry], vol. 68, no. 9, pp. 865–872. (In Russ.)
- Pyle J. M., Spear F. S., Wark D. A. 2002, Electron microprobe analysis of REE in apatite, monazite and xenotime: protocols and pitfalls. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, vol. 48, pp. 337–362. <https://doi.org/10.2138/rmg.2002.48.8>
- Suzuki K., Kato T. 2008, CHIME dating of monazite, xenotime, zircon and polycrase: Protocol, pitfalls and chemical criterion of possibly discordant age data. *Gondwana Research*, vol. 14, issue 4, pp. 569–586. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2008.01.005>
- Montel J.-M., Foret S., Veschambre M., Nicollet C., Provost A. 1996, Electron microprobe dating of monazite. *Chemical Geology*, vol. 131, issue 1–4, pp. 37–53. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(96\)00024-1](https://doi.org/10.1016/0009-2541(96)00024-1)
- Popova V. I., Gubin V. A. 2008, Mineralogy of granite ceramic pegmatites of the Aduisky, Sokolovsky and Zenkovsky massifs in the Middle Urals. *Ural'skiy mineralogicheskii sbornik* [Ural mineralogical collection]. Miass; Ekaterinburg, no. 15, pp. 61–74. (In Russ.)
- Popova V. I., Gubin V. A., Churin E. I., Kotlyarov V. A., Khiller V. V. 2013, Rare metal mineralization of granite pegmatites of the Rezhevsky region in the Middle Urals. *Zapiski Rossiyskogo mineralogicheskogo obshchestva* [Notes of the Russian Mineralogical Society], vol. 142, no. 1, pp. 23–38. (In Russ.)
- Ginzburg I. I. 1928, Feldspars of the Rezhevsky district. *Vestnik Geologicheskogo komiteta* [Bulletin of the Geological Committee], no. 6, pp. 39–48. (In Russ.)
- Smirnov V. N., Ivanov K. S., Krasnobaev A. A., Bushlyakov I. N., Kalganov B. A. 2006, Results of K–Ar dating of the Aduisky granite massif (eastern slope of the Middle Urals). *Litosfera* [Lithosphere], no. 2, pp. 148–156. (In Russ.)
- Popova V. I., Churin E. I., Gubin V. A. 2010, Xenotime-(Y) from ceramic pegmatites of the Aduisky massif. *Ural'skiy mineralogicheskii sbornik* [Ural mineralogical collection]. Miass; Ekaterinburg, no. 17, pp. 125–130. (In Russ.)
- Suzuki K., Adachi M. 1991, Precambrian provenance and Silurian metamorphism of the Tsubonosawa paragneiss in the South Kitakami terrane, Northeast Japan, revealed by the chemical Th–U-total Pb isochron ages of monazite, zircon and xenotime. *Geochemical Journal*, vol. 25, issue 5, pp. 357–376. <https://doi.org/10.2343/geochemj.25.357>
- Popova V. I., Khiller V. V., Erokhin Yu. V., Popov V. A. 2010, Monazites of late granitic pegmatites of the Ilmen Mountains: chemical dating of the age of zonal-sectoral crystals. *Novyye dannyye o mineralakh* [New data on minerals], issue 45, pp. 72–78. (In Russ.)
- Krasnobaev A. A., Fershtater G. B., Bea F., Montero P. 2006, Polygenic zircons from the Aduisky batholith (Middle Urals). *Doklady Akademii nauk* [Reports of the Academy of Sciences], vol. 410, no. 2, pp. 244–250. (In Russ.)
- Fershtater G. B., Gerdes A., Smirnov V. N. 2003, Age and history of formation of the Aduisky granite massif. *Ezhegodnik-2002 Instituta geologii i geokhimi Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta* [Yearbook-2002 of the Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences], pp. 146–150. (In Russ.)
- Khiller V. V., Erokhin Yu. V. The chemical composition and dating of accessory zircon from granitic pegmatites in the north-eastern part of the Aduisky massif. *Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta* [News of the Ural State Mining University], issue 4 (52), pp. 26–32. (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.21440/2307-2091-2018-4-26-32>
- Votyakov S. L., Shchapova Yu. V., Hiller V. V. 2011, Crystal chemistry and physics of radiation-thermal effects in a number of U–Th-containing minerals as a basis for their chemical microprobe dating. Ekaterinburg, 340 p. (In Russ.)
- Khiller V. V., Erokhin Yu. V. 2021, Chemical composition and age of monazite from granite pegmatites of the Semeninskaya mine (Aduy massif, Middle Urals). *Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta* [News of the Ural State Mining University], issue 4 (64), pp. 7–15. (In Russ.) <http://doi.org/10.21440/2307-2091-2021-4-7-15>

19. Khiller V. V., Popov M. P., Erokhin Yu. V., Zakharov A. V. 2015, Th–U–Pb age of rare-metal granite pegmatites in the eastern exocontact of the Aduisky massif (Middle Urals). *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Voronezh State University], no. 4, pp. 61–65. (In Russ.)
20. Mao J., Du A., Seltmann R., Yu J. 2003, Re–Os ages for the Shameika porphyry Mo deposit and the Lipovy Log rare metal pegmatite, central Urals, Russia. *Mineralium Deposita*, vol. 38, pp. 251–257. <http://doi.org/10.1007/s00126-002-0331-2>
21. Vishnyakova M. D., Borodina N. S., Fershtater G. B., Soloshenko N. G., Streletskaya M. V. 2018, Processes of migmatization and granite formation in the western exocontact of the Aduisky massif (Middle Urals). *Vestnik Permskogo universiteta* [Bulletin of Perm University], vol. 17, no. 3, pp. 208–227. (In Russ.) <http://doi.org/10.17072/psu.geol.17.3.208>

The article was received on August 25, 2023

Ксенотим-(Y) из гранитных пегматитов копи «Монацитовая», Адуйский массив, Средний Урал (химический состав и возраст)

Вера Витальевна ХИЛЛЕР*
Юрий Викторович ЕРОХИН**

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

Аннотация

Актуальность работы обусловлена необходимостью совершенствования метода химического датирования в применении к высокоурановым и высокоторийевым акцессорным минералам, которые сложно изучать изотопными методами исследования.

Цель работы – исследование химического состава акцессорного ксенотима из гранитных пегматитов копи «Монацитовая» (западная часть Адуйского массива) и определение его возраста.

Методология исследования. Количественный анализ химического состава монацита выполнен на электронно-зондовом микроанализаторе САМЕСА SX 100 (ИГГ УрО РАН, г. Екатеринбург). Условия измерения: ускоряющее напряжение 15 кВ, сила тока 250 нА, диаметр пучка электронов 2 мкм. Давление в камере образцов 2×10^{-4} Па. Спектры получены на наклонных волновых спектрометрах, измерение интенсивности проводилось по аналитическим линиям: Y L α , Si K α , (кристалл-анализатор ТАР), U M β , Pb M α , Ca K α , Th M α , P K α (РЕТ), Yb L α , Dy L α , Er L α , Gd L α , Lu L α , Sm L β (LiF). Проведен учет наложения пиков спектральных линий, что крайне важно при количественном определении содержания свинца (линии Y L $\gamma_{2,3}$ и Th M $\zeta_{1,2}$ накладывается на аналитическую линию Pb M α). Время набора импульсов на пиках аналитических линий в два раза больше, чем для фона, и составляло 60 с для Th, 40 с для U и Pb и 10 с для остальных элементов. При проведении исследований применялось линейное планирование эксперимента по варьированию времени измерения интенсивностей M β -линии урана, M α -линий тория и свинца. Рассчитанные пределы обнаружения составляют 345 г/т для U, 283 г/т для Th, 65 г/т для Pb, 205 г/т для Y.

Результаты. Установлено, что ксенотим относится к иттриевой разновидности и отличается повышенным содержанием урана (UO $_2$ до 8,8 мас. %) и тория (ThO $_2$ до 4,5 мас. %). По результатам химического датирования (по данным 32 анализов), ксенотим-(Y) показывает средневзвешенный возраст 276 ± 7 млн лет (СКВО = 0,54). При построении зависимости (ThO $_2$ + UO $_2^{экв}$)-PbO точки ложатся на одну изохрону. Расчет возраста по углу наклона изохроны дал датировку 276 ± 12 млн лет (СКВО = 0,94).

Выводы. Полученные значения возраста для ксенотима хорошо согласуются с датировками пегматоидных гранитов Крутихинского массива, который находится на западном контакте Адуйского гранитного массива, и относительно недалеко от копи «Монацитовая». Вполне возможно, что некоторые пегматиты в западной части Адуйского массива формировались в результате становления Крутихинского массива.

Ключевые слова: ксенотим-(Y), химическое датирование, гранитные пегматиты, жила «Монацитовая», Адуйский массив, Средний Урал.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов К. С., Ерохин Ю. В., Федоров Ю. Н., Хиллер В. В., Пономарев В. С. Изотопное и химическое U–Pb-датирование гранитоидов Западно-Сибирского мегабассейна // Докл. АН. 2010. Т. 433. № 5. С. 671–674.
2. Хиллер В. В., Ерохин Ю. В., Захаров А. В., Иванов К. С. Th–U–Pb-датирование гранитных пегматитов Липовского рудного поля (Урал) по трем минералам // Доклад АН. 2014. Т. 455. № 2. С. 216–219. <https://doi.org/10.7868/s0869565214080210>
3. Королюк В. Н., Нигматулина Е. Н. Регистрация M α -линии свинца в фосфатах редких земель на микроанализаторе JEOL JXA-8100 // Журнал аналитической химии. 2013. Т. 68. № 9. С. 865–872.
4. Pyle J. M., Spear F. S., Wark D. A. Electron microprobe analysis of REE in apatite, monazite and xenotime: protocols and pitfalls // Reviews in Mineralogy and Geochemistry. 2002. Vol. 48. P. 337–362. <https://doi.org/10.2138/rmg.2002.48.8>
5. Suzuki K., Kato T. CHIME dating of monazite, xenotime, zircon and polycrase: Protocol, pitfalls and chemical criterion of possibly discordant age data // Gondwana Research. 2008. Vol. 14. Issue 4. P. 569–586. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2008.01.005>
6. Montel J.-M., Foret S., Veschambre M., Nicollet C., Provost A. Electron microprobe dating of monazite // Chemical Geology. 1996. Vol. 131. Issue 1–4. P. 37–53. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(96\)00024-1](https://doi.org/10.1016/0009-2541(96)00024-1)
7. Попова В. И., Губин В. А. Минералогия гранитных керамических пегматитов Адуйского, Соколовского и Зенковского массивов на Среднем Урале // Уральский минералогический сборник. Миасс; Екатеринбург: УрО РАН, 2008. № 15. С. 61–74.
8. Попова В. И., Губин В. А., Чуринов Е. И., Котляров В. А., Хиллер В. В. Редкометаллическая минерализация гранитных пегматитов Режевского района на Среднем Урале // Записки РМО. 2013. Т. 142. № 1. С. 23–38.

✉ hilvervit@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-8491-4958>

**erokhin-yu@yandex.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-0577-5898>

9. Гинзбург И. И. Полевые шпаты Режевского района // Вестник Геологического комитета. 1928. № 6. С. 39–48.
10. Смирнов В. Н., Иванов К. С., Краснобаев А. А., Бушляков И. Н., Калеганов Б. А. Результаты К–Аг датирования Адуйского гранитного массива (восточный склон Среднего Урала) // Литосфера. 2006. № 2. С. 148–156.
11. Попова В. И., Чуринов Е. И., Губин В. А. Ксенотим-(Y) из керамических пегматитов Адуйского массива // Уральский минералогический сборник. Миасс; Екатеринбург: ИМин УрО РАН, 2010. № 17. С. 125–130.
12. Suzuki K., Adachi M. Precambrian provenance and Silurian metamorphism of the Tsubonosawa paragneiss in the South Kitakami terrane, Northeast Japan, revealed by the chemical Th–U-total Pb isochron ages of monazite, zircon and xenotime // Geochemical Journal. 1991. Vol. 25. Issue 5. P. 357–376. <https://doi.org/10.2343/geochemj.25.357>
13. Попова В. И., Хиллер В. В., Ерохин Ю. В., Попов В. А. Монациты поздних гранитных пегматитов Ильменских гор: химическое датирование возраста зонально-секториальных кристаллов // Новые данные о минералах. 2010. Вып. 45. С. 72–78.
14. Краснобаев А. А., Ферштатер Г. Б., Беа Ф., Монтеро П. Полигенные цирконы Адуйского батолита (Средний Урал) // Докл. АН. 2006. Т. 410. № 2. С. 244–250.
15. Ферштатер Г. Б., Гердес А., Смирнов В. Н. Возраст и история формирования Адуйского гранитного массива // Ежегодник-2002 Ин-та геологии и геохимии УрО РАН. 2003. С. 146–150.
16. Khiller V. V., Erokhin Yu. V. The chemical composition and dating of accessory zircon from granitic pegmatites in the north-eastern part of the Aduisky massif // Известия УГГУ. 2018. Вып. 4 (52). С. 26–32. <http://dx.doi.org/10.21440/2307-2091-2018-4-26-32>
17. Вотьяков С. Л., Щапова Ю. В., Хиллер В. В. Кристаллохимия и физика радиационно-термических эффектов в ряде U–Th-содержащих минералов как основа для их химического микронзондового датирования. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2011. 340 с.
18. Khiller V. V., Erokhin Yu. V. Chemical composition and age of monazite from granite pegmatites of the Semeninskaya mine (Aduy massif, Middle Urals) // Известия УГГУ. 2021. Вып. 4 (64). С. 7–15. <http://doi.org/10.21440/2307-2091-2021-4-7-15>
19. Хиллер В. В., Попов М. П., Ерохин Ю. В., Захаров А. В. Th–U–Pb-возраст редкометалльных гранитных пегматитов в восточном экзо-контакте Адуйского массива (Средний Урал) // Вестник ВГУ. Сер.: Геология. 2015. № 4. С. 61–65.
20. Mao J., Du A., Seltnann R., Seltnann R., Yu J. Re–Os ages for the Shameika porphyry Mo deposit and the Lipovy Log rare metal pegmatite, central Urals, Russia // Mineralium Deposita. 2003. Vol. 38. P. 251–257. <http://doi.org/10.1007/s00126-002-0331-2>
21. Вишнякова М. Д., Бородин Н. С., Ферштатер Г. Б., Солошенко Н. Г., Стрелецкая М. В. Процессы мигматизации и гранитообразования в западном экзоконтакте Адуйского массива (Средний Урал) // Вестник Пермского университета. Геология. 2018. Т. 17. № 3. С. 208–227. <http://doi.org/10.17072/psu.geol.17.3.208>

Статья поступила в редакцию 25 августа 2023 года

Pentlandite and its alteration products in serpentinites of the Itkul'sky ultrabasic massif (Southern Urals)

Anna Evgen'evna BOGOMOLOVA*

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

Abstract

The relevance of the work is due to the need to study the mineralogy of the only indigenous manifestation of jewelry olivine within the Ural region.

The purpose of the work is to study pentlandite and the products of its supergene alteration in serpentinites of the Itkul'sky ultrabasic massif in the Southern Urals.

Research methodology. The composition of some minerals was analyzed using a scanning electron microscope JSM-6390LV from Jeol with an energy dispersive attachment INCA Energy 450 X-Max 80 from Oxford Instruments (analyst L. V. Leonova). The same instrument was used to obtain images of minerals in BSE (back-scattered electron) mode. X-ray structural study of minerals was carried out on an XRD-7000 X-ray diffractometer from Shimadzu with polycapillary optics and a high-temperature attachment NTK-1200N from Anton Paar for operation in the temperature range 25–1500 °C (analyst O. L. Galakhova). Conditions: copper radiation, $V = 40$ kV, $I = 30$ mA, step size – 0.02°.

Results. Pentlandite is the main sulfide mineral of antigorite serpentinites; it is characterized by a fairly pure chemical composition; the only impurities in the mineral are cobalt (from 0 to 1.18 wt. %). According to the Ni/Fe ratio, the sulfide belongs to nickel and pentlandite proper. Smythite replaces pentlandite grains along the cracks and at the edges. Chemical composition, wt. %: S – 40.81; Fe – 37.65; Co – 1.66; Ni – 19.87, well calculated for the crystal chemical formula of smythite – $(\text{Fe}_{5.83}\text{Ni}_{2.93}\text{Co}_{0.24})_{9.00}\text{S}_{11.00}$. Cronstedtite replaces the pentlandite matrix in the form of veined segregations. It is distinguished by its chemical composition: SiO_2 – 17,82; Fe_2O_3 – 40,00; NiO – 11,02; FeO – 18,06; MnO – 0,57; MgO – 2,23; CaO – 1,30; H_2O – 9,00 (by difference in accordance with the standard), which is calculated based on the crystal chemical formula of Ni-Mg-bearing cronstedtite – $(\text{Fe}^{2+}_{0.95}\text{Ni}_{0.71}\text{Mg}_{0.21}\text{Ca}_{0.09}\text{Mn}_{0.03})_{1.99}\text{Fe}^{3+}_{1.01}[(\text{Si}_{1.12}\text{Fe}^{3+}_{0.88})_{2.00}\text{O}_5](\text{OH})_{3.80}$.

Conclusions. Pentlandite from antigorite serpentinites of the Itkul'sky ultrabasic massif (Southern Urals) was studied. Under the influence of weathering processes, most of the pentlandite grains were partially replaced by secondary sulfide – smythite and ferruginous serpentine – cronstedtite.

Keywords: pentlandite, smythite, cronstedtite, antigorite serpentinite, Itkul'sky massif, Southern Urals.

Introduction

The Itkul'sky ultrabasic massif is located in the north of the Chelyabinsk region (Southern Urals) directly east of Lake Itkul (Fig. 1, a). About fifteen chromite ore occurrences were discovered within the massif [1], most of which were mined in tsarist times. Even at the beginning of the 20th century, it was mentioned that in some mines collection samples with plates of pink chrome chlorite were mined [2]. In the same massif on Mount Vishnyovaya in 1846, the only occurrence of jewelry olivine in the Urals was discovered, which was first mistaken for a new mineral – glinkite [3], but almost immediately correctly attributed to chrysolite [4]. Olivine was described in more detail much later [5, 6]. At the same time, the mineralogy of the host antigorite serpentinites was extremely poorly studied.

Geological position of the Itkul'sky massif. Geologically, Mount Vishnyovaya is entirely composed of antigorite serpentinites, carbonated and talcized in areas, which occur in metamorphic rocks of the Middle Riphean Saitovskaya group (Fig. 1, b). This block of serpentinites, up to 3 km in size, is the eastern fragment of the Itkul'sky ultrabasic massif, the main

body of which is located directly on the eastern shore of Lake Itkul. The ultrabasic massif stretches along the eastern shore of the lake within 8 km in length and up to 2 km in width. In the eastern and northern parts of the massif, serpentinites are intruded by small bodies of granitoids of Carboniferous age.

It was previously established that the olivine veins at Mount Vishnyovaya are represented by metasomatic olivinites [6]. The thickness of the veins usually does not exceed 10 cm (Fig. 2), and in places of swelling it reaches 30 cm. In the host serpentinites, olivinitization, talcification and carbonatization are noted at the contact with the veins. In addition to olivine veins, the antigorite serpentinites of Mount Vishnyovaya contain clinocllore and tremolite veins up to 10 cm thick. When studying the antigorite serpentinites, scattered dissemination of pentlandite was discovered, which underwent secondary alterations. The study of this mineralization is presented in this work.

Research methods

All analytical studies of the samples were carried out at the Institute of Geography, Ural Branch, Russian Academy of Sci-

*adelaidaval1983@gmail.com

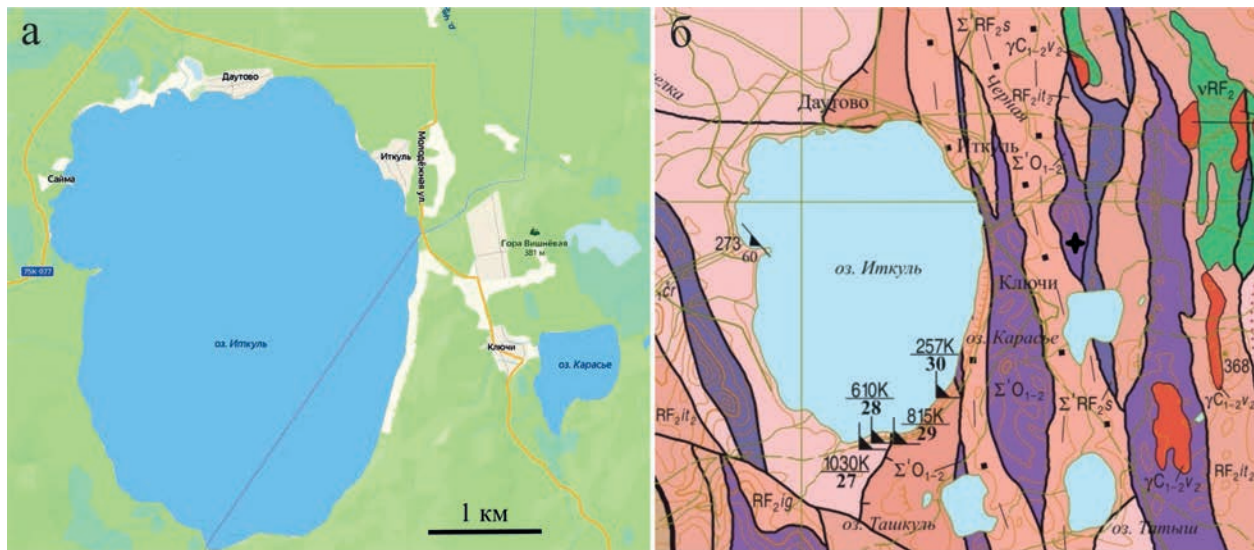


Figure 1. Sampling site (indicated by a star) on Mount Vishnyovaya in the vicinity of Lake Itkul: a – topographical diagram, given using Yandex Maps; b – geological diagram, given according to [7]

Рисунок 1. Место отбора образцов (обозначено звездочкой) на горе Вишневая в окрестностях озера Иткуль: а – топографическая схема, дано с использованием Яндекс Карты; б – геологическая схема, дано по [7]



Figure 2. Olivine (brown) vein, almost without talc, in antigorite serpentinite (light green). Photo by Yu. V. Erokhin

Рисунок 2. Оливиновая (коричневого цвета) жила, почти без талька, в антигоровом серпентините (светло-зеленого цвета). Фото Ю. В. Ерохина

ences, in the Laboratory of Physicochemical Research Methods. The composition of some minerals was analyzed using a scanning electron microscope JSM-6390LV from Jeol with an energy dispersive attachment INCA Energy 450 X-Max 80 from Oxford Instruments (analyst L. V. Leonova). The same instrument was used to obtain images of minerals in BSE (back-scattered electron) mode.

Petrogenic components were determined on an XRF 1800 X-ray fluorescence wave spectrometer from Shimadzu, which is equipped with a powerful (4 kW) X-ray tube (Rh anode), TAP, PET, Ge, LiF (200) analyzer crystals, as well as a vacuum stabilizer, flow-proportional and scintillation counters (analyst N. P. Gorbunova). Losses on ignition were determined by the wet chemistry method (analyst G. S. Neupokoeva).

X-ray structural study of minerals was carried out on an XRD-7000 X-ray diffractometer from Shimadzu with polycapillary optics and a high-temperature attachment NTK-1200N from Anton Paar for operation in the temperature range 25-1500°C (analyst O. L. Galakhova). Conditions: copper radiation, $V = 40 \text{ kV}$, $I = 30 \text{ mA}$, step size – 0.02° .

Results and their discussion

Pentlandite in serpentinites forms scattered dissemination in the form of individual isometric and weakly elongated grains, up to 50 μm in size, and their clusters. The sulfide forms both independent segregations (Fig. 3, a, b) and intergrowths with magnetite (Fig. 3, c, d). In this case, iron oxide contains a high admixture of chromium (Cr_2O_3 up to 11.4 wt. %), which, when recalculated, gives 17% of the chromite end value. Other impurities in it include magnesium (MgO up to 1.0 wt. %), nickel (NiO up to 0.6 wt. %), manganese (MnO up to 0.2 wt. %), vanadium (V_2O_5 up to 0.2 wt. %) and cobalt (CoO up to 0.1 wt. %). The crystal chemical formula is as follows – $(\text{Fe}^{2+}_{0.91}\text{Mg}_{0.06}\text{Ni}_{0.02}\text{Mn}_{0.01})_{1.00}(\text{Fe}^{3+}_{1.66}\text{Cr}_{0.34})_{2.00}\text{O}_4$. Apparently, this chromium-containing magnetite appeared as a result of the replacement of the primary accessory chromium spinel [6].

Antigorite serpentinite is characterized by the following chemical composition (in weight %) – SiO_2 46,63; Al_2O_3 1,15; Fe_2O_3 1,60; FeO 3,52; MgO 35,22; LOI 11,26; The amount is 99,38, i. e. its iron content is 7%. According to X-ray phase analysis, the rock consists almost entirely of serpentine – antigorite. Olivine from antigorite serpentinites, in contact with olivine veins, belongs to forsterite and contains 14% fayalite component. It contains an admixture of manganese (MnO up to 0.1 wt. %) and traces of calcium. The crystal chemical formula is as follows – $(\text{Mg}_{1.72}\text{Fe}_{0.28})_{2.00}[\text{Si}_{1.00}\text{O}_4]$. Talc from antigorite serpentinites is weakly ferrous (FeO 1.4–1.6 wt. %) and contains an admixture of chromium (Cr_2O_3 up to 0.05 wt. %). The crystal chemical formula is as follows – $(\text{Mg}_{2.89}\text{Fe}_{0.09}\text{Cr}_{0.01})_{2.99}[\text{Si}_{4.00}\text{O}_{10}](\text{OH})_2$. The carbonate in antigorite serpentinites belongs to ferruginous magnesite (FeO up to 11.6 wt. %) with the crystal chemical formula – $(\text{Mg}_{0.86}\text{Fe}_{0.14})_{1.00}[\text{CO}_3]$. In addition

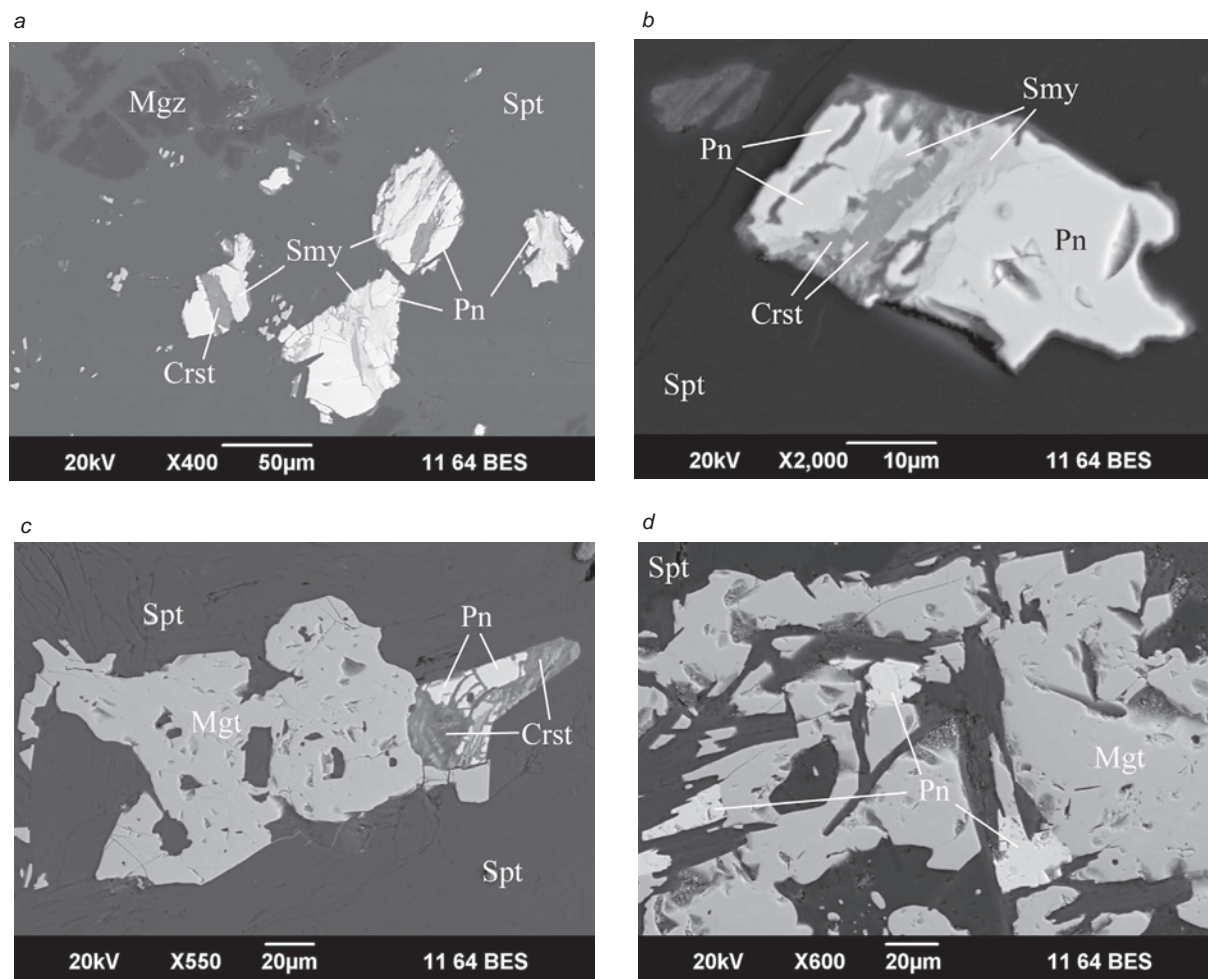


Figure 3. Pentlandite in antigorite serpentinites of the Itkulsky massif: a, b – independent segregations; c, d – intergrowths with magnetite. BSE photo, SEM JSM-6390LV; Pn – pentlandite, Smy – smythite, Crst – Cronstedtite, Mgt – magnetite, Spt – serpentine, Mgz – magnesite
Рисунок 3. Пентландит в антигоритовых серпентинитах Иткульского массива: а, б – самостоятельные выделения; в, г – срращения с магнетитом. BSE-фото, СЭМ JSM-6390LV; Pn – пентландит, Smy – смизит, Crst – кронстедтит, Mgt – магнетит, Spt – серпентин, Mgz – магнезит

to iron and magnesium, the carbonate contains small impurities of manganese (MnO up to 0.3 wt. %) and nickel (NiO up to 0.2 wt. %) [6].

Pentlandite is characterized by a fairly pure chemical composition (Table 1); among the impurities in the mineral, only cobalt is noted (from 0 to 1.18 wt. %). In the well-known classification of pentlandites [8], low-cobalt sulfide (Co <10 at. %) according to the Ni/Fe ratio is divided into three varieties: nickel pentlandite (Ni/Fe >1.30), pentlandite proper (Ni/Fe within 0.90–1.30) and ferruginous pentlandite (Ni/Fe < 0.90). Itkul analyzes have a Ni/Fe ratio in the range of 1.20–1.39, i. e. belong to nickel and pentlandite proper. Sulfide is a common mineral of ultrabasic and basic rocks, as well as metasomatites and metamorphites after them, i.e. it was formed as a result of serpentinization of ultrabasic rocks [9].

Sulfide grains often have secondary alterations, which is explained by the influence of weathering processes, because sampling was carried out from rock outcrops. Alterations in pentlandite manifest themselves in the form of the development of secondary sulfide – smysite and ferruginous serpentine – cronstedtite (Fig. 3, a, b, c).

Smythite replaces pentlandite grains along the cracks and at the edges; it is clearly distinguished in the BSE im-

Table 1. Chemical composition of pentlandite from serpentinites of Mount Vishnyovaya, wt. %

Таблица 1. Химический состав пентландита из серпентинитов г. Вишнёвая, мас. %

Analysis number	Elements				Crystal chemical formula
	S	Fe	Co	Ni	
1	33.60	27.74	–	38.66	(Ni _{5.09} Fe _{3.83}) _{8.92} S _{8.08}
2	33.26	28.40	0.58	37.75	(Ni _{4.97} Fe _{3.93} Co _{0.08}) _{8.98} S _{8.02}
3	33.08	29.16	0.79	36.97	(Ni _{4.88} Fe _{4.04} Co _{0.10}) _{9.02} S _{7.98}
4	33.56	26.60	0.92	38.92	(Ni _{5.12} Fe _{3.68} Co _{0.12}) _{8.92} S _{8.08}
5	32.95	28.25	1.00	37.80	(Ni _{4.99} Fe _{3.92} Co _{0.13}) _{9.04} S _{7.96}
6	33.20	28.99	1.11	36.69	(Ni _{4.83} Fe _{4.01} Co _{0.15}) _{8.99} S _{8.01}
7	32.85	28.65	1.18	37.33	(Ni _{4.93} Fe _{3.97} Co _{0.16}) _{9.06} S _{7.94}

Note: SEM JSM-6390LV from Jeol with EMF attachment INCA Energy 450 X-Max 80 from Oxford Instruments, analyst L. V. Leonova.

age by its darker color compared to the pentlandite matrix. Chemical composition (wt. %): S 40.81; Fe 37.65; Co 1.66; Ni 19.87, well calculated for the crystal chemical formula of smythite – (Fe_{5.83}Ni_{2.93}Co_{0.24})_{9.00}S_{11.00}. This sulfide was first described in 1956 in sedimentary rocks near Bloomington (Indiana, USA), where, together with pyrrhotite, it formed

inclusions in calcite [10]. A similar nickel-bearing smythite was described as a secondary mineral after pyrrhotite and pentlandite in copper-nickel deposits of Canada [11]. In the Urals, smythite was described in hydrothermal formations of the Komsomolsk sulfoantimonite-gudmundite deposit (Polar Urals) [12].

Cronstedtite replaces the pentlandite matrix in the form of veined segregations and irregularly shaped clusters, which are clearly distinguished in the BSE image by a dark gray color against the background of light sulfides. It is distinguished by its chemical composition – SiO₂ 17,82; Fe₂O₃ 40,00; NiO 11,02; FeO 18,06; MnO 0,57; MgO 2,23; CaO 1,30; H₂O 9,00 (by difference in accordance with the standard), which is calculated based on the crystal chemical formula of nickel-magnesium-containing cronstedtite – (Fe²⁺_{0.95}Ni_{0.71}Mg_{0.21}Ca_{0.09}Mn_{0.03})_{1.99}Fe³⁺_{1.01}

[(Si_{1.12}Fe³⁺_{0.88/2.00})O₅](OH)_{3.80}. Interestingly, Ni-Mg-bearing cronstedtites are characteristic of meteorites – carbonaceous chondrites [13]. In metabasites, this mineral replaces copper-iron sulfides (chalcopyrite, bornite, etc.) and is characterized by an increased copper content [14]. In the Urals, classical cronstedtite was discovered in the crushing zones of pyrite-pyrrhotite ores of the Uzelginksoye copper pyrite deposit [15].

Conclusions

Thus, the author has studied in detail pentlandite from antigorite serpentinites of the Itkul'sky ultrabasic massif (Southern Urals). According to the Ni/Fe ratio, they belong to nickel and pentlandite proper. Under the influence of weathering processes, most of the pentlandite grains were partially replaced by secondary sulfide – smythite and ferruginous serpentine – cronstedtite.

The author thanks Ph.D. Yu. V. Erokhin for assistance in the research and preparation of this article.

The work was carried out within the framework of the state assignment of the IGG, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, state no. reg. 123011800014-3.

REFERENCES

1. Perevozchikov B. V. et al. 2000, Register of chromite occurrences in alpine-type ultrabasites of the Urals. Perm, 474 p. (*In Russ.*)
2. Nikolaev A. V. 1912, On the mineralogy of the Kyshtym mountain district. Minerals of Kyshtym and Kasli dachas. *Trudy Geologicheskogo muzeya im. Petra Velikogo Imperatorskoy akademii nauk* [Proceedings of the Geological Museum named after Peter the Great of the Imperial Academy of Sciences], vol. 6, pp. 171–231. (*In Russ.*)
3. Romanovsky G. D. 1847, Glinkite, a new Ural mineral. *Gornyy zhurnal* [Mining magazine], no. 4, pp. 142–144. (*In Russ.*)
4. Beck W. W. 1847, Chemical analysis of glinkite. Negotiations of the Russian Imperial Mineralogical Society in St. Petersburg. St. Petersburg, pp. 244–249.
5. Varlavov A. S., Raevsky A. N. 1991, Chrysolite (glinkite) from the lake area of Itkul (Southern Urals). *Mineralogicheskii zhurnal* [Mineralogical Journal], vol. 13, no. 2, pp. 76–79. (*In Russ.*)
6. Erokhin Yu. V., Zakharov A. V., Ponomarev V. S., Petrov D. A., Kropantsev S. Yu. 2022, Forsterite from the Itkul'sky hypermafic massif (Southern Urals). *Zapiski rossiyskogo mineralogicheskogo obshchestva* [Notes of the Russian Mineralogical Society], vol. 151, no. 5, pp. 87–101. (*In Russ.*) <https://doi.org/10.31857/S0869605522050033>
7. Kalugina R. D., Kopanev V. F., Storozhenko E. V., Lukin V. G., Stepanov A. E., Mikhaleva E. N., Rapoport M. S., Ilyasova G. A., Suslov D. L., Shub I. Z., Mikhailov A. P., Glazyrina N. S., Gerasimenko B. N. 2017, State geological map of the Russian Federation. Moscow, 180 p. (*In Russ.*)
8. Shishkin N. N., Karpenkov A. M., Kulagov E. A., Mitenkov G. A. 1974, On the classification of minerals of the pentlandite group. *Doklady akademii nauk SSSR* [Reports of the USSR Academy of Sciences], vol. 217, no. 1, pp. 194–197. (*In Russ.*)
9. Begizov V. D. et al. 1990, Mineralogy of the Urals: Elements. Carbides. Sulfides. Sverdlovsk, 390 p. (*In Russ.*) <https://elibrary.ru/srjhzo>
10. Erd R. C., Evans H. T., Richter D. H. 1957, Smythite, a new iron sulfide, and associated pyrrhotite from Indiana. *American Mineralogist*, vol. 42, pp. 309–333.
11. Nickel E. H. 1972, Nickeliferous smythite from some Canadian occurrences. *Canadian Mineralogist*, vol. 11, pp. 514–519.
12. Yakovleva O. A. 1988, Mineralogy of arsenic, raw material and bismuth in hydrothermal formations of the Polar-Ural meganticlinorium. PhD thesis. Leningrad, 27 p. (*In Russ.*)
13. Zolensky M., Mikouchi T., Fries M., Bodnar R., Jenniskens P., Yin Q., Hagiya K., Ohsumi K., Komatsu M., Colbert M., Hanna R., Maisano J., Ketcham R., Kebukawa Y., Makamura T., Matsuoka M., Sasaki S., Tsuchiyama A., Gounelle M., Le L., Martinez J., Ross K., Rahman Z. 2014, Mineralogy and petrography of C asteroid regolith: The Sutter's Mill CM meteorite. *Meteoritics & Planetary Science*, vol. 49, issue 11, pp. 1997–2016. <https://doi.org/10.1111/maps.12386>
14. Lobova E. V., Berzin S. V. 2011, Copper-bearing cronstedtite from parallel dolerite dikes of the Middle Urals. *Vestnik Ural'skogo otdeleniya Rossiyskogo mineralogicheskogo obshchestva* [Bulletin of the Ural Branch of the Russian Mineralogical Society], no. 8, pp. 68–71. (*In Russ.*)
15. Belogub E. V., Ovcharova E. S. 2003, Kronstedtite from the Uzelga copper pyrite deposit (Southern Urals). *Mineralogiya Urala* [Mineralogy of the Urals]. Miass, vol. 2, pp. 130–137. (*In Russ.*)

The article was received on August 27, 2023

Пентландит и продукты его изменения в серпентинитах Иткульского гипербазитового массива (Южный Урал)

Анна Евгеньевна БОГОМОЛОВА*

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

Аннотация

Актуальность работы обусловлена необходимостью изучения минералогии единственного коренного проявления ювелирного оливина в пределах Уральского региона.

Цель работы – исследование пентландита и продуктов его гипергенного изменения в серпентинитах Иткульского гипербазитового массива на Южном Урале.

Методология исследования. Состав некоторых минералов проанализирован с помощью сканирующего электронного микроскопа JSM-6390LV фирмы Jeol с энергодисперсионной приставкой INCA Energy 450 X-Max 80 фирмы Oxford Instruments (аналитик Л. В. Леонова). На этом же приборе были получены изображения минералов в режиме BSE (обратно рассеянных электронов). Рентгеноструктурное изучение минералов проведено на рентгеновском дифрактометре XRD-7000 фирмы Shimadzu с поликапиллярной оптикой и высокотемпературной приставкой НТК-1200N фирмы Anton Paar для работы в диапазоне температур 25–1500 °С (аналитик О. Л. Галахова). Условия съемки: медное излучение, $V = 40 \text{ kV}$, $I = 30 \text{ mA}$, размер шага – $0,02^\circ$.

Результаты. Пентландит – главный сульфидный минерал антигоритовых серпентинитов, он характеризуется достаточно чистым химическим составом, из примесей в минерале отмечается только кобальт (от 0 до 1,18 мас. %). По Ni/Fe-отношению сульфид относится к никелистому и собственно пентландиту. Смизит (или смайтит) замещает зерна пентландита по трещинам и с краев. Химический состав, мас. %: S – 40,81; Fe – 37,65; Co – 1,66; Ni – 19,87, хорошо рассчитывается на кристаллохимическую формулу смизита – $(\text{Fe}_{5,83}\text{Ni}_{2,93}\text{Co}_{0,24}\text{S}_{9,00})\text{S}_{11,00}$. Кронстедтит замещает матрицу пентландита в виде прожилковатых выделений. Выделяется по химическому составу: SiO_2 – 17,82; Fe_2O_3 – 40,00; NiO – 11,02; FeO – 18,06; MnO – 0,57; MgO – 2,23; CaO – 1,30; H_2O – 9,00 (по разности в соответствии с эталоном), который рассчитывается на кристаллохимическую формулу Ni–Mg-содержащего кронстедтита – $(\text{Fe}^{2+}_{0,95}\text{Ni}_{0,71}\text{Mg}_{0,21}\text{Ca}_{0,09}\text{Mn}_{0,03}\text{Fe}^{3+}_{1,01}[(\text{Si}_{1,12}\text{Fe}^{3+}_{0,88}\text{O}_{2,00})\text{O}_5](\text{OH})_{3,80})$.

Выводы. Изучен пентландит из антигоритовых серпентинитов Иткульского гипербазитового массива (Южный Урал). Под влиянием процессов выветривания большая часть зерен пентландита частично заместила вторичным сульфидом – смизитом и железистым серпентином – кронстедтитом.

Ключевые слова: пентландит, смизит, кронстедтит, антигоритовый серпентинит, Иткульский массив, Южный Урал.

ЛИТЕРАТУРА

1. Реестр хромитопоявлений в альпинотипных ультрабазитах Урала / Б. В. Перевозчиков [и др.]. Пермь: КамНИИКИГС, 2000. 474 с.
2. Николаев А. В. К минералогии Кыштымского горного округа. Минералы Кыштымской и Каслинской дач // Труды Геологического музея им. Петра Великого Императорской академии наук. 1912. Т. 6. С. 171–231.
3. Романовский Г. Д. Глинкит, новый уральский минерал // Горный журнал. 1847. № 4. С. 142–144.
4. Beck W. W. Chemische Analyse des Glinkits // Verhandlungen der Russisch-Kaiserlichen Mineralogischen Gesellschaft zu St. Petersburg. St. Petersburg, 1847. S. 244–249.
5. Варлаков А. С., Раевский А. Н. Хризолит (глинкит) из района оз. Иткуль (Южный Урал) // Минералогический журнал. 1991. Т. 13. № 2. С. 76–79.
6. Ерохин Ю. В., Захаров А. В., Пономарев В. С., Петров Д. А., Кропанцев С. Ю. Форстерит из Иткульского гипербазитового массива (Южный Урал) или еще раз о глинките // Записки РМО. 2022. Т. 151. № 5. С. 87–101. <https://doi.org/10.31857/S0869605522050033>
7. Калугина Р. Д., Копанев В. Ф., Стороженко Е. В., Лукин В. Г., Степанов А. Е., Михалева Е. Н., Рапопорт М. С., Ильясова Г. А., Суслев Д. Л., Шуб И. З., Михайлов А. П., Глазырина Н. С., Герасименко Б. Н. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 200 000. Изд. второе. Сер. Среднеуральская. Лист О-41-XXXI: объяснит. записка. М.: Московский филиал ФГБУ ВСЕГЕИ, 2017. 180 с.
8. Шишкин Н. Н., Карпенков А. М., Кулагов Э. А., Митенков Г. А. О классификации минералов группы пентландита // Докл. АН СССР. 1974. Т. 217. № 1. С. 194–197.
9. Минералогия Урала. Элементы. Карбиды. Сульфиды / В. Д. Бегизов [и др.]. Свердловск: УрО АН СССР, 1990. 390 с. <https://elibrary.ru/srjhzo>
10. Erd R. C., Evans H. T., Richter D. H. Smythite, a new iron sulfide, and associated pyrrhotite from Indiana // American Mineralogist. 1957. Vol. 42. P. 309–333.
11. Nickel E. H. Nickeliferous smythite from some Canadian occurrences // Canadian Mineralogist. 1972. Vol. 11. P. 514–519.
12. Яковлева О. А. Минералогия мышьяка, сурьмы и висмута в гидротермальных образованиях Полярно-Уральского мегантиклинория: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Л., 1988. 27 с.

*adelaidaval1983@gmail.com

13. Zolensky M., Mikouchi T., Fries M., Bodnar R., Jenniskens P., Yin Q., Hagiya K., Ohsumi K., Komatsu M., Colbert M., Hanna R., Maisano J., Ketcham R., Kebukawa Y., Makamura T., Matsuoka M., Sasaki S., Tsuchiyama A., Gounelle M., Le L., Martinez J., Ross K., Rahman Z. Mineralogy and petrography of C asteroid regolith: The Sutter's Mill CM meteorite // *Meteoritics & Planetary Science*. 2014. Vol. 49. Iss. 11. P. 1997–2016. <https://doi.org/10.1111/maps.12386>
14. Лобова Е. В., Берзин С. В. Медьсодержащий кроншtedтит из параллельных долеритовых даек Среднего Урала // *Вестник УрО РМО*. 2011. № 8. С. 68–71.
15. Белогуб Е. В., Овчарова Е. С. Кроншtedтит из Узельгинского медноколчеданного месторождения (Южный Урал) // *Минералогия Урала-2003: материалы IV Всерос. совещ. Миасс: ИМин УрО РАН, 2003. Т. 2. С. 130–137.*

Статья поступила в редакцию 27 августа 2023 года

Закономерности распределения содержаний золота и серебра в рудных телах Березовского месторождения (Средний Урал)

Геннадий Петрович ДВОРНИК*

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

Аннотация

Актуальность работы обусловлена важным промышленным значением золоторудных месторождений, сопряженных с метасоматитами березит-лиственитовой формации, в мировой добыче.

Цель работы – изучение закономерностей распределения концентраций золота и серебра в рудных телах Березовского месторождения.

Методы исследования включали выделение промышленных типов руд для оценки качества золотого оруденения, использование вероятностно-статистической, геометро-статистической и геостатистической моделей для характеристики амплитудной и частотной изменчивости содержаний золота и серебра в рудных телах Березовского месторождения.

Результаты. Установлены определенные закономерности в распределении концентраций золота и серебра в основных типах руд Березовского месторождения. Так, в пределах минерализованных даек гранитоидов по процентному соотношению богатых, рядовых и бедных руд, значениям коэффициентов богатства и золото-серебряного отношения наилучшим качеством выделяются сульфидно-кварцевые руды в полосовых жилах в сравнении с более бедными вкрапленными рудами в околожилных березитах. В распределении параметров золотого оруденения (концентраций золота и серебра, линейной продуктивности руд) установлена ярусная вертикальная зональность с выделением от 2 до 3 уровней наибольшего площадного распространения оруденения по падению минерализованных даек гранитоидов в интервале глубин 112–712 м. А по простиранию рудоносности даек гранитоидов в распределении содержаний золота и серебра в рудах отмечается латеральная зональность, выраженная в закономерном возрастании продуктивности руд на горизонтах по мере удаления в направлении с юга на север от контакта Шарташского гранитного массива. По амплитудной изменчивости распределение концентраций золота и серебра в минерализованных дайках гранитоидов варьирует от весьма неравномерного до крайне неравномерного. Среди красичных сульфидно-кварцевых жил Березовского месторождения по содержанию в них золота и серебра, линейной продуктивности руд наилучшим качеством характеризуются жилы, сформировавшиеся на верхнерудном уровне (53–168 м). А с возрастанием глубины залегания жил на среднерудном (201–262 м) и нижнерудном (442–512 м) горизонтах качество руд закономерно снижается.

Ключевые слова: дайки гранитоидов, полосовые и красичные сульфидно-кварцевые жилы, вкрапленные руды в березитах, зональность, содержания золота и серебра, распределение.


Введение

Березовское золоторудное месторождение на Среднем Урале расположено к северо-востоку от Шарташского гранитного массива верхисетского комплекса. Рудные тела на месторождении представлены серией (около 25) минерализованных даек гранитоидов каменноугольного возраста и красичными сульфидно-кварцевыми жилами среди вулканогенно-осадочных пород новоберезовской толщи и интрузивных основных и ультраосновных пород пышминского и первомайского комплексов (рис. 1).

Гранитоидные дайки Березовского месторождения объединяются в три меридиональные свиты [1]: западную (дайки Елизаветинская, Первоначальная и др.), центральную (дайки Первопавловская, Андреевская, Ильинская и др.) и восточную (дайки Леонтьевская, Борисовская, Соймановская и др.). Длина даек гранитоидов достигает

нескольких километров при мощности 7–20 м. Золотое оруденение на месторождении развито в пределах минерализованных даек гранитоидов в «полосовых» сульфидно-кварцевых жилах мощностью от нескольких сантиметров до нескольких десятков сантиметров при средней мощности 10 см, во вкрапленных рудах в окаймляющих их зонах березитов мощностью 0,2–1 м и в «красичных» сульфидно-кварцевых жилах мощностью от нескольких сантиметров до 1,5 м при средней мощности 30 см, залегающих в породах основного и ультраосновного состава (габбро, долеритах, серпентинитах, тальк-карбонатных метасоматитах, лиственитах). Рудные минералы в сульфидно-кварцевых жилах представлены пиритом, блеклыми рудами, халькопиритом, галенитом, айкинитом, золотом, во вкрапленных рудах в березитах – пиритом

*gpdvornik@yandex.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-9013-2223>

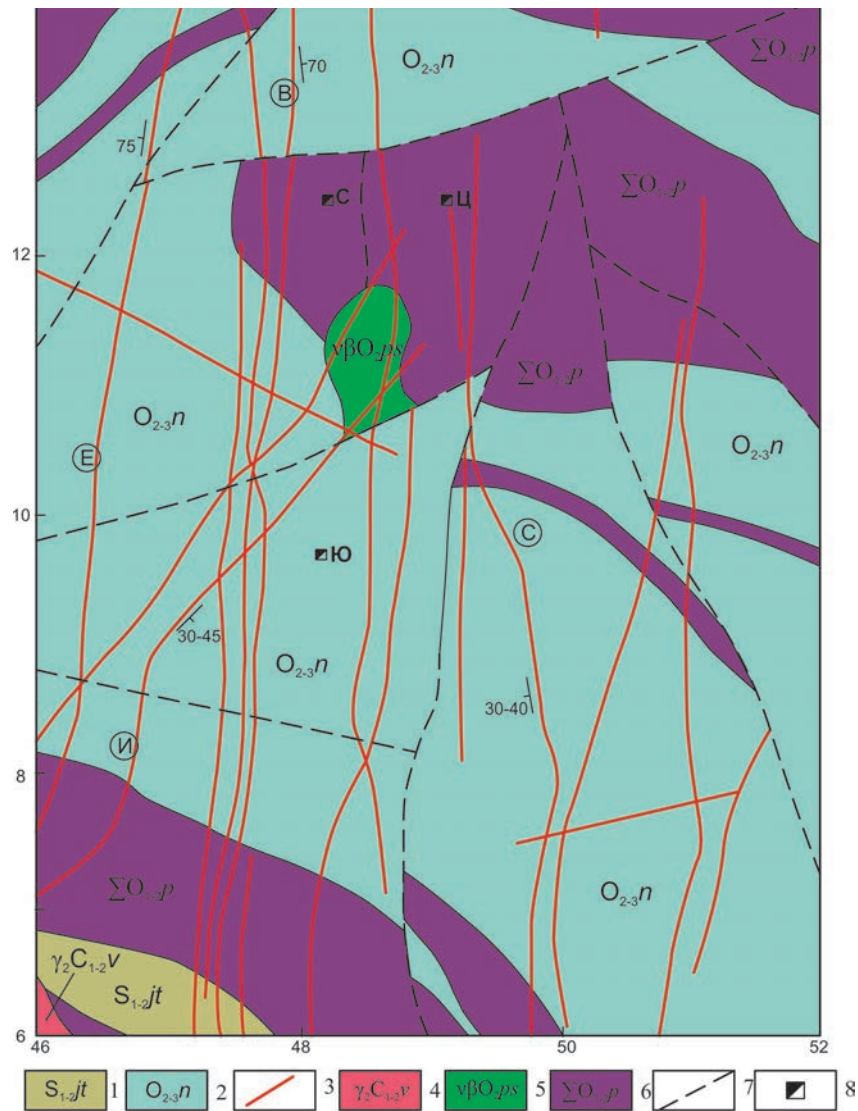


Рисунок 1. Геологическая карта Березовского золоторудного месторождения [1, 2]: 1 – сланцы, алевролиты, песчаники кремнисто-терригенной толщи; 2 – базальты и их туфы, кремнистые сланцы новоберезовской толщи; 3 – минерализованные дайки гранитоидов (И – Ильинская, Е – Елизаветинская, В – Второпавловская, С – Соymanовская); 4 – граниты Шарташского массива; 5 – габбро-долериты пishминского комплекса; 6 – метагипербазиты (серпентиниты) первомайского комплекса; 7 – разрывные нарушения; 8 – шахты (С – Северная, Ю – Южная, Ц – Центральная разведочная). Система координат Березовского рудника (сетка через 1 км)

Figure 1. Geological map of Berezovskoe gold ore deposit [1, 2]: 1 – shales, siltstones, sandstones of siliceous-terrigenous strata; 2 – basalts, their tuffs, siliceous shales of novoberezovskaya strata; 3 – mineralized dikes granitoids (И – Il'inskaya, Е – Elizavetinskaya, В – Vtoropavlovskaya, С – Soymanovskaya); 4 – granites of Shartash massiff; 5 – gabbro-dolerite of pishminsky complex; 6 – metabasites (serpentinites) of pervomaisky complex; 7 – tectonic faults; 8 – mine (N – North, S – South, C – Central prospect). System coordinate of Berezovsky mine (grid over 1 km)

и золотом. Отложение минералов в жилах происходило последовательно в четыре стадии: 1) анкерит-кварцевую; 2) золото-пирит-кварцевую; 3) золото-полиметаллически-кварцевую; 4) карбонатную [3, 4]. В распределении этих минеральных ассоциаций на Березовском месторождении установлена эндогенная зональность [5, 6].

Метасоматиты березит-лиственитовой формации образовались в процессе кислотного выщелачивания при температуре 280–395 °С и давлении 0,6–2,0 кбар под воздействием флюидов мантийно-корового генезиса [7]. В близких физико-химических условиях (T = 290–360 °С, P = 2,5 кбар) сформировались в эту стадию гидротермальные полосовые и красичные кварцевые жилы [8]. Кристаллизация рудных минералов пирит-кварцевой и полиметаллически-кварцевой ассоциаций в жилах про-

исходила в позднюю щелочную стадию гидротермального процесса при T = 285–150 °С и P = 2,3–0,3 кбар [9]. Формирование березитов и золотого оруденения Березовского месторождения протекало по данным U–Pb изотопного анализа в интервале 296–292 млн лет, а время кристаллизации гранитов Шарташского массива и дайкового комплекса составило 312–298 млн лет [10].

Березовское месторождение золота по сложности геологического строения относится к 3-й группе по классификации ГКЗ. Проведенными на месторождении геологоразведочными работами, включавшими проходку скважин колонкового бурения, горных выработок (шахт, квершлагов, штреков, ортов, восстающих, уклонов), опробование, геофизические исследования, установлено развитие промышленного золотого оруденения до глуби-

Таблица 1. Качественная характеристика жильного и вкрапленного типов руд в минерализованных дайках гранитоидов Березовского месторождения

Table 1. Qualitative description vein and impregnation types ores in mineralized dikes granitoids of Berezovskoe deposit

Рудные тела (дай-ки)	Природные типы руд	Горизон-ты, м	Количество блоков	Количество проб	Промышленные типы руд, %			Коэффици-ент богатства	Золото-сере-бряное отно-шение
					Богатые	Рядовые	Бедные		
Елизаветинская	Жильный	120	3	197	69,0	20,0	11,0	30,9	0,38
		162	13	482	39,0	26,0	35,0	20,0	1,09
		212	6	162	46,0	23,0	31,0	12,0	0,60
		262	15	617	40,0	28,0	32,0	19,3	0,72
		412	4	244	23,0	24,0	53,0	10,2	0,46
	512	10	333	22,0	16,0	62,0	10,1	0,65	
	Вкрапленный	120	3	135	1,0	6,0	93,0	0,9	0,20
		162	13	206	–	4,0	96,0	0,3	0,40
		212	6	157	–	2,0	98,0	0,4	0,20
		262	15	479	5,0	5,0	90,0	0,6	0,30
412		4	111	–	1,0	99,0	0,4	0,20	
512	10	232	1,0	2,0	97,0	0,4	0,43		
Первопавловская	Жильный	212	33	1214	40,0	29,0	31,0	10,9	0,30
		262	36	1380	36,0	30,0	43,0	13,2	0,48
		314	15	564	37,0	30,0	33,0	10,5	0,34
		412	13	536	32,0	31,0	37,0	14,4	0,80
		462	11	502	39,0	24,0	37,0	16,4	0,84
	512	21	1310	37,0	29,0	34,0	13,4	1,91	
	Вкрапленный	212	33	1445	0,6	3,5	95,9	0,8	0,23
		262	36	1110	0,5	1,9	97,6	0,4	0,19
		314	15	475	–	2,0	98,0	0,4	0,27
		412	13	347	–	7,0	93,0	0,6	0,37
462		11	383	2,0	3,0	95,0	0,6	0,17	
512	21	885	1,0	3,0	96,0	0,6	0,34		
Второпавловская	Жильный	212	29	1693	40,0	27,0	33,0	16,6	0,46
		262	25	1378	41,0	27,0	32,0	12,3	0,50
		314	11	548	35,0	28,0	37,0	9,5	0,29
		462	19	596	54,0	19,0	27,0	16,2	1,41
		512	21	2027	35,0	31,0	34,0	10,6	0,68
	Вкраплен-ный	212	29	1193	0,5	2,0	97,5	0,6	0,12
		262	25	859	0,5	3,5	96,0	0,6	0,19
		314	11	319	3,0	5,0	92,0	1,0	0,28
		462	19	308	4,0	9,0	87,0	0,9	0,66
		512	21	1514	0,5	2,5	97,0	0,6	0,20

ны 750 м [11]. Балансовые запасы золота категории C_1 и C_2 были сосредоточены на месторождении в полосовых (лестничных) сульфидно-кварцевых жилах (54 %), во вкрапленных рудах в околожильных березитах (43 %) и в красичных сульфидно-кварцевых жилах (3 %). Березовское месторождение по величине запасов золота (466 т) относится к крупным объектам [12]. Его разработка началась в 1748 г. За 250 лет эксплуатации на нем было добыто 340 т золота [13]. Во второй половине XX в. (1955–1999 гг.) добыча золота на Березовском месторождении составила свыше 64 т при среднем содержании 2,36 г/т [14].

Березовское месторождение является эталонным объектом геолого-промышленного типа плутогенных гидротермальных месторождений золото-полисульфидных руд, приуроченных к интрузивным телам, представленным сериями даек и малыми интрузивами преимущественно кислого состава, на долю которых приходится 5 % мировой добычи золота [15]. К этому типу относятся также крупные золоторудные месторождения в Казахстане (Бестюбе, Джеламбет, Васильковское) [16–18], Чармитан в Узбекистане [19], Ливенгуд в США, суперкрупное по запасам золота (1210 т) месторождение Донлин Крик на полуострове Аляска в США [20, 21].

Таблица 2. Качественная характеристика руд в минерализованных дайках гранитоидов на разных горизонтах Березовского месторождения

Table 2. Qualitative description ores in mineralized dikes granitoids on different horizons of Berezovskoe deposit

Рудные тела (дай-ки)	Горизонты, м	Количество проб	Промышленные типы руд, %			Линейная продуктив-ность, км × г/т	Золото-серебря-ное отношение
			Богатые	Рядовые	Бедные		
Елизаветинская	120	332	28	14	58	8,3	0,31
	162	688	27	19	54	24,3	0,82
	212	319	23	13	64	5,1	0,40
	262	1096	25	18	57	23,5	0,56
	412	355	16	17	67	6,6	0,37
	512	565	13	10	72	8,4	0,50
Первопавловская	212	2659	19	15	66	23,7	0,26
	262	2490	20	17	63	36,8	0,39
	314	1039	20	17	63	11,8	0,30
	412	883	19	22	59	14,6	0,62
	462	885	23	15	62	12,4	0,56
	512	2195	23	19	58	21,8	1,31
Второпавловская	712	168	2	7	91	0,9	0,75
	112	678	41	22	37	25,9	–
	212	2886	23	16	61	33,4	0,32
	262	2237	25	19	56	23,3	0,40
	314	867	23	20	57	8,5	0,29
	462	904	37	16	47	12,5	1,15
Саймановская–Соединенная	512	3541	20	19	61	18,3	0,47
	712	897	2	5	93	1,2	0,54
	112	155	43	16	41	4,7	–
	212	732	40	22	38	7,8	–
	262	315	23	16	61	5,0	–
	314	76	33	12	55	1,3	–
Ильинская	412	598	27	18	55	13,3	0,61
	512	1906	17	14	69	15,3	0,25
	112	107	24	18	58	0,3	0,54
	314	327	34	15	51	1,3	0,54
	412	134	26	31	43	0,3	0,27
Андреевская	512	519	22	15	63	1,1	0,33
	712	110	4	11	85	0,2	0,17
	142	219	42	22	36	0,5	0,62
	175	172	37	20	43	0,3	0,37
	412	426	22	16	62	1,4	0,55
	462	593	22	19	59	0,8	0,58
Андреевская	512	1019	16	16	68	1,6	0,48
	712	38	3	11	86	0,1	0,17

Методика исследований

Фактическим материалом для изучения закономерностей распределения концентраций золота и серебра в рудных телах Березовского месторождения являются представительные данные геологической документации и эксплуатационного опробования руд на золото и серебро в разведочных штреках, пройденных на разных горизонтах по простиранию минерализованных даек гранитоидов

и красичных жил [22–24]. Отбор проб на пробирный анализ на золото и серебро проводился на месторождении задирковым, точечным и бороздовым способами с учетом мощности руд при определении средних содержания этих компонентов в эксплуатационных блоках. Оценка вариации качества золотого оруденения Березовского месторождения включала выделение по содержанию золота промышленных типов руд: богатых (более 10 г/т),

Таблица 3. Изменчивость качества руд по простиранию минерализованных даек гранитоидов Березовского месторождения
Table 3. Variability quality ores on strike mineralized dikes granitoids of Berezovskoe deposit

Рудные тела (дайки)	Горизонты, м	Части месторождения	Количество блоков	Количество проб	Промышленные типы руд, %			Коэффициент богатства	Золото-серебряное отношение
					Богатые	Рядовые	Бедные		
Елизаветинская		Северная	5	429	27	20	53	16,9	0,72
	262	Центральная	5	260	19	15	66	5,4	0,52
		Южная	5	407	22	22	56	8,5	0,43
Первопавловская	212	Северная	11	647	20	17	63	6,6	0,36
		Центральная	11	1072	16	14	70	5,1	0,20
		Южная	11	940	16	14	70	5,0	–
	262	Северная	12	755	25	22	53	10,5	0,70
		Центральная	12	962	18	15	67	5,3	0,25
		Южная	12	773	18	18	64	6,0	0,27
Второпавловская	212	Северная	10	939	26	16	58	14,1	0,39
		Центральная	10	1233	23	17	60	8,2	0,26
		Южная	9	714	23	18	59	7,5	0,33
	262	Северная	9	808	26	13	61	9,3	0,56
		Центральная	8	728	25	17	58	8,0	0,30
		Южная	8	701	20	23	57	6,0	0,32
Соймановская – Соединенная		Северная	8	699	22	16	62	5,6	0,30
	512	Центральная	8	580	24	15	61	8,2	0,33
		Южная	8	627	8	14	78	2,8	0,13

рядовых (3–10 г/т) и бедных (0,1–3 г/т), определение значений золото-серебряного отношения и коэффициентов богатства как отношения средних содержаний золота в основных природных типах руд и блоках к минимальному промышленному содержанию [25]. Для исследования амплитудной изменчивости концентраций золота и серебра в эксплуатационных блоках месторождения использовалась вероятностно-статистическая модель, основной характеристикой которой является коэффициент вариации оценочного параметра. Оценка частотной изменчивости в распределении содержаний золота и серебра в рудах проводилась в результате сглаживания по геометро-статистической модели [26] исходных данных опробования разведочных штреков с помощью пятичленного интерполяционного полинома по программе «Аппроксимация» и определения радиусов геометрической автокорреляции при преобладании закономерной составляющей изменчивости содержаний полезных компонентов руд над ее случайной составляющей или их равных соотношениях. В противных случаях для концентраций золота и серебра в рудах с помощью геостатистической модели [27, 28] строились по профилям разведочных штреков графики изменения автокорреляционной функции и определялись значения радиусов автокорреляции.

Распределение содержаний золота и серебра в рудных телах Березовского месторождения

Объектом проведенных исследований являются дайки гранит-порфиров и плагиогранит-порфиров Березовского месторождения (Елизаветинская, Первопавловская, Второпавловская, Андреевская, Ильинская, Соймановская), рис. 1, наиболее продуктивные по количеству разведанных запасов золота (более 80 %). В процессе исследований были обработаны по программам «Статистика», «Аппроксимация», «Автокорреляция» 33 130 пробирных анализов на золото и серебро задирковых, точечных и бороздовых проб, отобранных из кварцево-жильных и вкрапленных руд в березитах в 413 эксплуатационных блоках Березовского месторождения. В пределах минерализованных даек гранитоидов (Елизаветинской, Первопавловской, Второпавловской) наилучшим качеством золотого оруденения по процентному содержанию богатых, рядовых и бедных руд в блоках на отдельных горизонтах в интервалах глубин от 120 до 512 м, средним значением коэффициентов богатства (9,5–30,9) и золото-серебряного отношения (0,29–1,91) характеризуются полосовые сульфидно-кварцевые жилы. А для вкрапленного типа золотого оруденения в околожильных березитах характерны резкое преобладание в процентном отношении на всех

Таблица 4. Изменчивость содержаний золота в рудах в минерализованных дайках гранитоидов на разных горизонтах Березовского месторождения

Table 4. Variability gold contents in ores in mineralized dikes granitoids on different horizons of Berezovskoe deposit

Рудные тела (дайки)	Горизонты, м	Блоки	Длина профиля L, м	Количество проб	Коэффициент вариации V, %	Изменчивость		Радиус автокорреляции R _a , м	
						Закономерная	Случайная		
Андреевская	175	106	96	74	206	0,34	0,49	2,1	
		107	76	62	196	0,23	0,56	1,0	
		Среднее		136	196–206			1,6	
		108	139	81	324	0,25	0,56	0,9	
		110	143	64	246	0,23	0,57	0,7	
	412	11	140	99	214	0,21	0,60	0,5	
		113	117	42	173	0,26	0,62	0,4	
		114	75	51	228	0,36	0,41	1,0	
		Среднее		337	173–324			0,7	
		111	137	181	225	0,33	0,48	0,4	
	462	112	108	131	285	0,38	0,39	1,7	
		113	119	155	199	0,29	0,55	0,4	
		114	78	79	170	0,24	0,62	1,8	
		Среднее		546	170–285			1,1	
		108	157	108	388	0,25	0,55	1,3	
		109	113	84	185	0,28	0,55	0,6	
		110	141	170	211	0,26	0,58	1,6	
		111	144	83	195	0,21	0,63	1,8	
		112	112	83	209	0,25	0,57	1,0	
		113	122	64	150	0,24	0,59	0,7	
	512	114	75	101	185	0,35	0,33	–	
		115	96	99	216	0,30	0,54	0,4	
		116	46	74	235	0,20	0,58	1,0	
		117	100	153	210	0,29	0,54	0,6	
		Среднее		588	150–388			0,9	
		112	96	69	30	148	0,50	0,37	–
			97	99	77	206	0,38	0,52	1,0
			Среднее		107	148–206			1,0
103			71	66	141	0,30	0,55	0,6	
104			74	80	180	0,30	0,48	0,8	
314	105	108	72	182	0,20	0,61	2,1		
	106	88	59	191	0,36	0,50	1,2		
	Среднее		277	141–191			1,2		
	412	119	95	73	149	0,23	0,58	1,6	
		107	95	94	221	0,36	0,51	1,8	
110		143	69	184	0,33	0,49	1,3		
112		125	112	213	0,32	0,51	0,4		
512	113	123	80	212	0,28	0,57	0,7		
	117	82	100	193	0,28	0,57	0,4		
	Среднее		455	184–221			0,9		

горизонтах бедных руд, более низкое среднее значение коэффициентов богатства (0,3–1,0) и золото-серебряного отношения (0,12–0,66), табл. 1. Сульфидно-кварцевый тип оруденения в полосовых жилах является на месторождении основным типом руд, в котором сосредоточено более половины разведанных запасов золота. Вторым

по промышленному значению и величине запасов золота (около 200 т) является вкрапленный тип оруденения в околожильных березитах, выделяющийся более низким качеством руд, невысокими концентрациями в них золота (0,1–3 г/т), но большей мощностью зон березитизации (0,2–1 м) в сравнении с полосовыми жилами.

Таблица 5. Изменчивость содержаний серебра в рудах в минерализованных дайках гранитоидов на разных горизонтах Березовского месторождения

Table 5. Variability silver contents in ores in mineralized dikes granitoids on different horizons of Berezovskoe deposit

Рудные тела (дай-ки)	Горизон-ты, м	Блоки	Длина профиля L, м	Количество проб	Среднее содержание С, г/т	Кoeffициент вариации V, %	Изменчивость		Радиус автокорреляции R _a , м
							Закономерная	Случайная	
Андреевская	412	108	139	56	3,09	116	0,28	0,53	1,3
		110	143	63	2,68	138	0,24	0,55	1,2
		111	140	85	1,96	111	0,28	0,56	0,6
		113	117	41	2,01	137	0,41	0,30	–
		114	75	51	3,69	136	0,22	0,58	1,0
	Среднее			296	2,53	111–138			1,0
	462	111	137	145	3,02	130	0,30	0,53	2,5
		112	108	111	7,12	143	0,27	0,52	1,4
		113	119	117	3,05	252	0,28	0,56	0,6
		Среднее			373	4,28	130–252		
	512	108	157	76	1,85	226	0,28	0,55	0,7
		109	113	53	2,85	155	0,24	0,58	1,3
		110	141	114	1,87	269	0,25	0,54	1,3
		111	144	64	3,31	370	0,25	0,55	0,5
		112	112	75	7,12	272	0,24	0,55	2,5
113		122	58	3,94	193	0,27	0,57	0,4	
114		75	53	1,46	382	0,43	0,25	–	
115		93	49	2,78	136	0,36	0,48	4,2	
117		100	112	2,71	164	0,22	0,59	1,6	
Среднее			654	2,76	136–382			1,4	
Ильинская	314	103	71	98	7,16	164	0,36	0,47	2,8
		104	74	97	7,13	220	0,41	0,30	–
		105	108	116	4,53	351	0,25	0,54	1,8
		Среднее			311	5,78	164–351		

Отличительной чертой многих гидротермальных золоторудных месторождений является вертикальная минералого-геохимическая зональность в размещении золотого оруденения [29–31]. Ее выявление имеет как научный интерес, так и практическое значение для прогнозирования и поисков золотого оруденения. На 15 золоторудных месторождениях основных геолого-промышленных типов (Советское, Васильковское, Нежданинское, Олимпиада, Дукат, Карамкен и др.) в распределении параметров золотого оруденения (концентраций золота и серебра, продуктивности руд, мощности тел) и околорудных метасоматитов выделены три типа вертикальной рудно-метасоматической зональности: контрастный и неконтрастный, градиентный и ярусный [32]. В результате проведенных исследований в распределении параметров золотого оруденения в минерализованных дайках гранитоидов Березовского месторождения (Елизаветинской, Первопавловской, Второпавловской, Соймановской и Соединен-

ной), наиболее продуктивных по количеству разведанных запасов золота (68,8 %), установлена ярусная вертикальная зональность. По падению этих рудоносных даек в интервале глубин 112–712 м по значениям рассчитанной для отдельных горизонтов месторождения линейной продуктивности руд выделяются от 2 до 3 уровней наибольшего площадного распространения промышленного золотого оруденения в рудных телах: в Первопавловской дайке на 262, 412 и 512 горизонтах, во Второпавловской дайке на 212 и 512 горизонтах, в Елизаветинской дайке на 162 и 262 горизонтах, в Соймановской и Соединенной дайках на 212 и 512 горизонтах (табл. 2). Двухъярусная вертикальная зональность выявлена и в распределении золотого оруденения на 412 и 512 горизонтах в пределах Андреевской дайки и на 314 и 512 горизонтах в Ильинской дайке, а отношение между максимальной и минимальной линейными продуктивностями руд на горизонтах, рассчитанными с учетом мощности сульфидно-кварцевых жил и

Таблица 6. Качественная характеристика руд в красичных сульфидно-кварцевых жилах Березовского месторождения
Table 6. Qualitative description ores in colour sulphide-quartz veins of Berezovskoe deposit

Рудные тела (жилы)	Горизонты, м	Количество проб	Промышленные типы руд, %			Коэффициент богатства	Линейная продуктивность, км · г/т	Золото-серебряное отношение
			Богатые	Рядовые	Бедные			
19	100	26	77,0	15,4	7,6	17,3	1,12	–
	53	29	86,2	3,4	10,4	80,0	2,91	–
	70	51	86,4	7,8	5,8	74,0	4,81	–
	85	52	85,0	7,5	7,5	79,8	9,44	–
173	100	24	66,6	4,1	29,3	56,0	3,28	–
	121	44	73,0	6,0	21,0	47,0	5,01	–
	168	101	55,4	16,8	27,8	55,6	13,30	–
	Среднее	301	72,1	10,0	17,9	64,0	6,65	–
	201	32	62,0	19,0	19,0	17,7	1,56	1,19
176	230	30	50,0	17,0	33,0	7,2	0,52	0,90
	262	21	23,8	23,8	52,4	3,6	0,27	1,14
	Среднее	83	48,2	19,3	32,5	10,3	0,78	1,07
179	262	69	78,3	17,4	4,3	26,1	6,51	1,01
	442	99	32,3	16,2	51,5	8,0	1,82	4,11
461	462	31	19,4	6,4	74,2	2,9	0,31	1,69
	Среднее	130	29,2	13,9	56,9	6,8	1,07	3,53
	448	34	64,7	29,4	5,9	33,4	2,52	8,05
464	455	43	83,8	11,6	4,6	22,4	2,45	4,36
	462	77	80,5	13,0	6,5	33,4	6,68	3,67
	Среднее	154	77,9	16,2	5,9	30,3	3,88	4,83
466	462	27	88,9	11,1	–	20,6	1,47	3,28
	512	21	14,0	43,0	43,0	5,9	0,31	0,61
	Среднее	48	56,3	25,0	18,7	14,2	0,89	2,11

околожилных березитов, составляет от 15,6 до 7,4. При этом среднее значение золото-серебряного отношения в рудах с увеличением глубины их залегания закономерно уменьшается.

В результате проведенных исследований изменчивости качества руд по простиранию минерализованных даек гранитоидов в западной, центральной и восточной частях Березовского месторождения (табл. 3) установлена латеральная зональность в распределении концентраций золота и серебра в рудах на всех уровнях локализации золотого оруденения (верхнерудном, среднерудном и нижнерудном), выраженная в закономерном возрастании продуктивности руд в дайках по мере удаления в направлении с юга на север от контакта Шарташского гранитного массива. По процентному соотношению богатых, рядовых и бедных руд, средним значениям коэффициентов богатства и золото-серебряного отношения наилучшее качество золотого оруденения в дайках установлено в северной части месторождения. А для руд, локализованных в южной части месторождения, характерны более низкие средние значения коэффициентов богатства и золото-серебряного отношения.

Распределение концентраций золота и серебра в рудах Березовского месторождения, локализованных в пределах минерализованных даек гранитоидов, изменяется по значениям коэффициентов их вариации – от весьма неравномерного до крайне неравномерного (табл. 4, 5). Это обусловлено сложным характером проявления золотого оруденения в дайках гранитоидов по их простиранию, постоянным чередованием в разведочных штреках более богатых сульфидно-кварцевых руд в полосовых жилах и более бедных вкрапленных руд в березитах. В распределении содержаний золота и серебра в рудах в большинстве эксплуатационных блоков преобладает случайная составляющая концентраций этих компонентов над ее закономерной составляющей. В результате проведенных исследований установлено, что наиболее высокой частотной изменчивостью в распределении содержаний золота и серебра в рудах в пределах минерализованных даек гранитоидов Березовского месторождения, выраженной средними значениями их радиусов автокорреляции, выделяются горизонты с наибольшей концентрацией золотоносных сульфидно-кварцевых жил в эксплуатационных

Таблица 7. Изменчивость содержаний золота в рудах красичных сульфидно-кварцевых жил Березовского месторождения
Table 7. Variability gold contents ores in colour sulphide-quartz veins of Berezovskoe deposit

Рудные тела (жилы)	Горизонты, м	Длина профиля L, м	Количество проб	Коэффициент вариации V, %	Изменчивость		Радиус геометрической автокорреляции R_{gr} , м
					Закономерная	Случайная	
19	100	50	26	116	0,68	0,19	4,5
	53	28	29	171	0,25	0,54	–
	70	50	51	97	0,35	0,46	–
	85	91	52	89	0,45	0,36	3,1
173	100	45	24	92	0,51	0,32	3,5
	121	82	44	79	0,37	0,40	–
		99	65	82	0,57	0,23	4,3
	168	85	36	61	0,52	0,24	5,7
	Среднее		327	61–171			4,2
176	201	68	32	123	0,85	0,05	5,2
	230	56	30	95	0,95	0,01	3,7
	262	58	21	162	0,92	0,01	3,9
	Среднее		83	95–162			4,3
179		52	26	148	0,92	0,02	4,0
	262	140	43	161	0,92	0,03	9,3
	Среднее		69	148–161			6,7
461		72	36	200	0,59	0,26	4,8
		52	26	512	0,25	0,53	–
	442	52	37	245	0,58	0,27	5,0
	462	81	31	460	0,30	0,51	–
	Среднее		13	20–460			4,9
464	448	58	34	274	0,42	0,40	3,9
	455	84	43	230	0,75	0,11	5,6
		48	24	223	0,63	0,25	7,3
	462	62	31	118	0,54	0,34	4,0
466	Среднее		154	118–492			5,5
	462	55	27	178	0,64	0,21	4,1
	512	41	21	161	0,18	0,65	–
	Среднее		48	161–178			4,1

блоках и максимальной линейной продуктивностью руд (табл. 2, 4, 5).

Красичные сульфидно-кварцевые жилы на площади Березовского месторождения располагаются во вмещающих дайки гранитоидов породах (габбро, долеритах, серпентинитах, тальк-карбонатных метасоматитах, листовенитах) преимущественно свитами, состоящими из 4–10 и более параллельных жил, реже в виде единичных жил протяженностью от 20 до 300 м и мощностью от первых сантиметров до 1,5 м [3, 4]. Красичные жилы на месторождении образовались одновременно с полосовыми кварцевыми жилами в дайках гранитоидов, нередко являясь продолжением последних во вмещающих породах.

Для изучения характера распределения мощности содержаний золота и серебра в красичных сульфидно-кварцевых жилах были использованы данные их геологической документации и эксплуатационного опробования (811 проб на золото и серебро) в разведочных штрехах, пройденных по простиранию красичных жил, сформировавшихся на разных уровнях локализации золотого оруденения в интервале глубин от 53 до 550 м [22].

В пределах месторождения наилучшим качеством золотого оруденения, исходя из процентного соотношения богатых, рядовых и бедных руд, среднего значения коэффициентов богатства и линейной продуктивности руд, характеризуются красичные жилы, образовавшие-

Таблица 8. Изменчивость содержаний серебра в рудах красичных сульфидно-кварцевых жил Березовского месторождения
Table 8. Variability silver contents in ores colour sulphide-quartz veins of Berezovskoe deposit

Рудные тела (жилы)	Горизонты, м	Длина профиля L, м	Количество проб	Среднее содержание С, г/т	Коэффициент вариации V, %	Изменчивость		Радиус геометрической автокорреляции R _q , м
						Закономерная	Случайная	
176	201	68	32	19,34	206	0,45	0,35	4,0
	230	56	30	10,40	131	0,64	0,23	3,7
	262	58	21	4,11	213	0,52	0,27	5,3
	Среднее		83	12,51	131–213			4,3
179		52	26	42,63	174	0,32	0,47	–
	262	140	43	28,82	228	0,60	0,30	7,4
	Среднее		69	33,59	174–228			7,4
461		72	36	6,57	226	0,47	0,25	6,5
	442	52	37	1,20	512	0,25	0,53	–
	462	81	31	2,25	170	0,64	0,26	6,2
	Среднее		104	2,50	170–512			6,4
464		52	26	1,20	219	0,63	0,26	4,7
		58	34	5,39	188	0,69	0,19	5,3
		84	43	6,68	188	0,71	0,19	6,5
		48	24	43,23	338	0,28	0,50	–
	462	44	22	4,80	148	0,62	0,25	4,0
		62	31	9,96	189	0,51	0,30	4,1
	Среднее		180	8,16	148–338			4,9
466		55	27	8,16	140	0,79	0,16	3,8
	512	41	21	12,57	102	0,31	0,46	–
	Среднее		48	10,09	102–140			3,8

еся на верхнерудном уровне (53–168 м), табл. 6. На этом уровне в наиболее протяженной красичной жиле 173, расположенной в северо-восточной части месторождения среди долеритов на пересечении с дайкой Самобытной, в распределении золотого оруденения по ее падению по значениям максимальной линейной продуктивности руд установлена, как и в дайках гранитоидов, двухъярусная вертикальная зональность на 85-м и 168-м горизонтах. С возрастанием глубины залегания красичных жил на среднерудном (201–262 м) и нижнерудном (442–512 м) горизонтах качество руд закономерно снижается: уменьшаются средние значения коэффициента богатства и линейной продуктивности руд и увеличивается в них золото-серебряное отношение. В целом красичные жилы Березовского месторождения по качеству руд сопоставимы с сульфидно-кварцевыми полосовыми жилами в минерализованных дайках гранитоидов (табл. 1, 6).

В распределении концентраций золота и серебра в красичных жилах Березовского месторождения резко преобладает, в отличие от минерализованных даек гранитоидов, закономерная составляющая изменчивости над ее случайной составляющей (табл. 4, 5, 7, 8). По амплитудной изменчивости распределение содержаний золота в красичных жилах изменяется от неравномерного до крайне

неравномерного, содержаний серебра в рудах – от весьма неравномерного до крайне неравномерного. Наибольшая частотная изменчивость в распределении концентраций золота установлена для красичных жил, образовавшихся на верхнерудном уровне. А красичные жилы, развитые на средних и нижних горизонтах Березовского месторождения, характеризуются меньшей частотной изменчивостью содержаний золота и серебра в разведочных штреках и близкими средними значениями их радиусов геометрической автокорреляции (табл. 7, 8).

Заключение

Латеральная и вертикальная зональность в распределении параметров золотого оруденения (концентраций золота и серебра, продуктивности руд) в минерализованных дайках гранитоидов и сульфидно-кварцевых красичных жилах Березовского месторождения, установленная в результате проведенных исследований, обусловлена совокупностью магматических, структурно-тектонических и гидротермально-метасоматических рудоконтролирующих факторов [33–36]. Одним из важных элементов магматического контроля оруденения месторождения является наличие эндогенной зональности в распределении рудных минеральных ассоциаций в дайках гранитоидов, выраженной в постепенной смене в меридиональ-

ном направлении по мере удаления на север от контакта Шарташского гранитного массива менее продуктивной золото-пирит-кварцевой ассоциации в дайках на более продуктивную золото-полиметаллически-кварцевую [5, 6]. По простираю минерализованных даек гранитоидов в этом направлении в эксплуатационных блоках увеличивается процентное количество богатых руд, средние значения коэффициента богатства и золото-серебряного отношения и улучшается качество руд. По мнению других авторов [37, 38], золотое оруденение максимально проявлено в дайках гранитоидов на участках их пересечения с гипербазиитами Пышминского массива. Характерной особенностью Березовского рудного поля является, согласно [37], приуроченность промышленного золотого оруденения в дайках гранитоидов (Елизаветинской, Соймановской и др.) к областям выклинивания двух наклоненных друг к другу межпластовых интрузий альпинотипных измененных гипербазитов (Шарташского и Пышминского силлов серпентинитов), расположенных над погружающейся на север поверхностью Шарташского гранитного массива. Установлена также четкая пространственная связь с гипербазиитами сульфидно-кварцевых красичных жил, которые на месторождении размещаются либо внутри тел ультрабазитов, замещенных тальк-карбонатными метасоматитами, либо вблизи контакта гипербазитов с долеритами в узлах пересечения жил с дайками гранитоидов (Савельевской, Переплетной, Соединенной) [39].

Исследования проведены в рамках государственного задания ИГГ УрО РАН по теме «Рудообразующие процессы и закономерности размещения месторождений полезных ископаемых во внутриплитных коллизионных складчатых поясах» (номер гос. учета НИОКТР 123011800011-2).

ЛИТЕРАТУРА

1. Березовское золоторудное месторождение (история и минералогия) / Д. А. Клейменов [и др.]. Екатеринбург: Уральский рабочий, 2005. 200 с.
2. Калугина Р. Д., Копанев В. Ф., Стороженко Е. В., Лукин В. Г., Степанов А. Е., Рапопорт М. С., Ильясова Г. А., Суслов Д. Л., Михалева Е. Н., Шуб И. З., Глазырина Н. С., Стратович В. И., Черняк З. Б., Михайлов А. П., Герасименко Б. Н. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 200 000. Издание второе. Сер. Среднеуральская. Лист О-41-XXV: объяснит. записка. М.: ВСЕГЕИ, 2017. 156 с.
3. Бородаевский Н. И., Бородаевская М. Б. Березовское рудное поле. М.: Металлургиздат, 1947. 264 с.
4. Кутюхин П. И. Условия локализации оруденения в жилах Березовского месторождения // 200 лет золотой промышленности Урала. Свердловск: Изд-во УФАН СССР, 1948. С. 249–275.
5. Беллавин О. В., Вагшаль Д. С., Ниренштейн В. А. Шарташский гранитный массив (Средний Урал) и связь с ним золотого оруденения // Известия АН СССР. Сер. геол. 1970. № 6. 86–90.
6. Самарцев И. Т., Захваткин В. А., Казимирский В. Ф., Михайлова Л. В., Бирюков В. Ф. О зональности Березовского золоторудного месторождения на Среднем Урале // Геология рудных месторождений. 1973. № 1. С. 110–117.
7. Бортников Н. С., Сазонов В. Н., Викентьева О. В., Викентьев И. В., Мурзин В. В., Наумов В. Б., Носик Л. П. Роль магматогенного флюида в формировании Березовского мезотермального золото-кварцевого месторождения, Урал // Докл. АН. 1998. Т. 363. № 1. С. 82–85.
8. Baksheev I. A., Prokof'ev V. Yu., Ustinov V. I. Genesis of metasomatic rocks and mineralized veins at the Berezovskoe deposit, Central Urals: Evidence from fluid inclusion and stable isotopes // Geochemistry International. 2001. Vol. 39. No. 9. P. 129–144.
9. Vikent'eva O. V., Bortnikov N. S., Vikentyev I. V., Groznova E. O., Lyubimtseva N. G., Murzin V. V. The Berezovsk giant intrusion-related gold-quartz deposit, Urals, Russia: Evidence for multiple magmatic and metamorphic fluid reservoirs // Ore Geology Reviews. 2017. Vol. 91. P. 837–863. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.08.018>
10. Прибавкин С. В., Монтеро П., Беа Ф., Ферштатер Г. Б. U–Pb возраст и состав пород Березовского золоторудного поля (Средний Урал) // Литосфера. 2013. № 1. С. 136–145. <https://elibrary.ru/qbxfaj>
11. Знаменитые месторождения Урала / Д. А. Клейменов [и др.]. Екатеринбург: Изд-во «Баско», 2006. Ч. 1. 240 с.
12. Прокофьев В. Ю., Наумов В. Б., Миронова О. Ф. Физико-химические параметры и геохимические особенности флюидов палеозойских золоторудных месторождений // Геохимия. 2018. № 12. С. 1141–1157. <https://doi.org/10.1134/S0016752518120087>
13. Бойцов В. Е., Пилипенко Г. Н., Солодов Н. А. Месторождения благородных, радиоактивных и редких металлов. М.: НИА-ПРИРОДА, 1999. 220 с.
14. Беневольский Б. И. Золото России: проблемы использования и воспроизводства минерально-сырьевой базы. Изд. 2-е. М.: Геоинформмарк, 2002. 464 с.
15. Добычные возможности недр / отв. ред. И. В. Егорова. М.: ФГБУ «ВИМС», 2019. 544 с.
16. Spiridonov E. M. Granitic rocks and gold mineralization of North Kazakhstan // Granite-related ore deposits of Central Kazakhstan and adjacent areas. St. Petersburg, 1996. P. 197–217.
17. Atlas of minerals deposit models (Republic of Kazakhstan). Almaty, 2004. 141 p.
18. Thompson J. F. H., Sillitoe R. H., Baker T., Lang J. R., Mortensen J. K. Intrusion-related gold deposits associated with tungsten-tin provinces // Mineralium Deposita. 1999. Vol. 34. P. 323–334. <https://doi.org/10.1007/s001260050207>

19. Bortnikov N. S., Prokof'ev V. Yu., Razdolina N. V. Origin of the Charmitan gold-quartz deposit (Uzbekistan) // *Geology of Ore Deposits*. 1996. Vol. 38. No. 3. P. 208–226.
20. Ebert S., Dodd S., Miller L., Petsel S. The Donlin Creek Au–As–Sb–Hg deposit, southwestern Alaska // *Geology and Ore Deposits 2000: The Great Basin and Beyond: Geological Society of Nevada Symposium Proceedings*. Nevada, USA, 2000. P. 1069–1081.
21. Goldfarb R. J., Baker T., Dube B., Groves D. I., Hart C. J. R., Gosselin P. Distribution, Character and Genesis of Gold Deposits in Metamorphic Terranes // *Economic Geology 100th Anniversary volume*. Littleton, Colorado, USA, 2005. P. 407–450. <https://doi.org/10.5382/AV100.14>
22. Дворник Г. П., Ощуква С. Л. Распределение мощности, содержаний золота и серебра в красичных жилах Березовского золоторудного месторождения // *Вестник УрО РМО*. 2009. Вып. 6. С. 34–40.
23. Дворник Г. П., Шалагинова И. А., Кубакаева И. П. Распределение содержаний золота и серебра в минерализованных дайках гранитоидов Березовского золоторудного месторождения // *Вестник УрО РМО*. 2010. Вып. 7. С. 42–52.
24. Дворник Г. П., Имамутдинов Е. В. Распределение содержаний золота и серебра в рудах Андреевской и Ильинской минерализованных даек гранитоидов Березовского месторождения // *Проблемы минералогии, петрографии и металлогении*. Научные чтения памяти П. Н. Чирвинского: сборник научных статей. Пермь: ПГНИУ, 2022. Вып. 25. С. 55–63. <https://doi.org/10.17072/chirvinsky.2022.55>
25. Дворник Г. П. Оценка изменчивости содержания золота и серебра в рудах и их качества при разведке и разработке золоторудных месторождений // *Известия вузов. Горный журнал*. 2011. № 3. С. 120–125.
26. Мягков В. Ф. Геохимический метод парагенетического анализа руд. М.: Недра, 1984. 128 с.
27. Капутин Ю. Е. Горные компьютерные технологии и геостатистика. СПб: Недра, 2002. 424 с.
28. Abzalov M. *Applied mining geology*. Switzerland: Springer international Publishing, 2016. 448 p.
29. Рундквист Д. В., Неженский И. А. Зональность эндогенных рудных месторождений. М.: Недра, 1975. 236 с.
30. Сазонов В. Н., Огородников В. Н., Поленов Ю. А. Вертикальная метасоматическая зональность и ее значение для прогнозирования слепого оруденения и оценка перспектив обрабатываемых месторождений на глубину (на примере золоторудных и золотополиметаллических месторождений) // *Литосфера*. 2008. №1. С. 77–89.
31. Rafailovich M. S. Vasilkovskoye deposit as an example of large-volume gold-sulphide-quartzes stovworks of the world-class // *News of the Academy of sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of geology and technical sciences*. 2013. No. 4. P. 16–28.
32. Константинов М. М., Варгунина Н. П., Косовец Т. Н., Симкин Г. С., Шишакова Л. Н. Минералого-геохимическая зональность золоторудных месторождений // *Геология рудных месторождений*. 1998. Т. 40. № 1. 20–34.
33. Поленов Ю. А., Огородников В. Н., Бабенко В. В. Березовское месторождение золота – уникальный объект полихронного и полигенного рудообразования. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2015. 150 с.
34. Бабенко В. В. Структурные условия размещения и зональность оруденения Березовского месторождения (Урал) // *Изв. АН СССР. Сер. геол.* 1978. № 10. С. 114–126.
35. Баранников А. Г. Березовское золоторудное месторождение: проблемы формирования, дальнейшего изучения // *Известия УГГУ*. 2019. Вып. 4 (56). С. 39–52. <https://doi.org/10.21440/2037-2091-2019-4-39-52>
36. Sazonov V., Smirnov V. The Shartash granitic pluton and Berezonsky gold deposit // *International Geology Field Conference in the Urals, Russia: Excursion Guidebook*. London, 2000. P. 20–31.
37. Желобов П. П. О взаимосвязи мантийных и верхнекоровых процессов при формировании Березовского золоторудного поля (Средний Урал) // *Известия УГГА*. 2002. Вып. 15. С. 12–17.
38. Кузовков Г. Н., Двоеглазов Д. А. Об астенолитовой модели Среднего Урала и строении Шарташской золоторудной вихревой структуры // *Руды и металлы*. 2002. № 4. С. 63–72.
39. Желобов П. П. Роль гипербазитов в локализации красичных жил на Березовском рудном поле // *Проблемы образования рудных столбов*. Новосибирск: СО АН СССР, 1972. С. 199–210.
40. Бабенко В. В., Поленов Ю. А., Огородников В. Н. Роль интрузивного магматизма в генезисе Березовского золоторудного месторождения (Средний Урал) // *Известия УГГУ*. 2016. Вып. 1 (41). С. 39–49.

Статья поступила в редакцию 30 мая 2023 года

Conformities distribution contents gold and silver in ore bodies of the Berezovskoe deposit (Middle Urals)

Gennadiy Petrovich DVORNIK*

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

Abstract

The relevance of the work is due to the importance industrial meaning associated with beresits and listvenites gold ores deposit in the world production.

Purpose of the work – study conformities of distribution gold and silver concentration in ore bodies of the Berezovskoe deposit.

Methods of research included separation industrial types of ores for valuation quality gold chute, use probabilistic-statistic, geometric-statistic and geostatistic models for description amplitude and frequency changeability gold and silver content in ore bodies of Berezovskoe deposit.

Results. It was established definite conformities in distribution contents gold and silver in primary types ores of Berezovskoe deposit. So in limits mineralized dikes granitoids on percentage correlation rich, ordinary and poor ores, meaning coefficients wealth and the gold-silver ratio the best quality distinguished sulphide-quartz ores in the strip veins in comparison with more poor impregnation ores in beresites near veins. In distribution parameters gold mineralization (contents gold and silver, linear productivity of ores) was established tier vertical zonality with separation 2–3 levels the largest foul prevalence mineralization on dip dikes granitoids in interval of depth 112–712 meters. In distribution contents gold and silver in ores registered lateral zonality on strike ore-bearing dikes granitoids. She expressed in conforming growth productivity of ores on horizons with moving off in direction with south to the north from the contact Shartash massif of granitoids. Distribution gold and silver content in mineralized dikes granitoids on amplitude variability changed from quite uneven to extremely uneven. Among colour sulphide-quartz veins of Berezovskoe deposit on content in their gold and silver, linear productivity of ores the best quality defined veins, formed on upper ore level (53–168 m). Quality ores conforming lowered with growth of depth bedding veins on middle ore level (201–262 m) and lower ore level (442–512 m) horizons.

Keywords: dikes granitoids, strip and colour sulphide-quartz veins, impregnation ores in beresites, zonality, content gold and silver, distribution.

The studies carried out as part of the state assignment of the IGG UB RAS (state registration number 123011800011-2).

REFERENCES

1. Kleimenov D. A. [et al.]. 2005, Berezovskoe gold ore deposit (history and mineralogy). Ekaterinburg, 200 p. (*In Russ.*)
2. Kalugina R. D., Kopanev V. F., Storozhenko E. V., Lukin V. G., Stepanov A. E., Rapoport M. S., Ilyasova G. A., Suslov D. L., Mikhaleva E. N., Shub I. Z., Glazyrina N. S., Stratovich V. I., Chernyak Z. B., Mikhailov A. P., Gerasimenko B. N. 2017, The State geological map of the Russian Federation 1 : 200 000 scale. Issue second. Middle Ural's series. Explanatory note. Moscow, 156 p. (*In Russ.*)
3. Borodaevsky N. I., Borodaevskaya M. B. 1947, Berezovskoe ore field. Moscow, 264 p. (*In Russ.*)
4. Kutukhin P. I. 1948, Mineralization locating conditions in the veins of the Berezovskoe deposit. 200 years gold industry of the Ural. Sverdlovsk, pp. 249–275. (*In Russ.*)
5. Bellavin O. V., Vagshal' D. S., Nirenshtein V. A. 1970, Shartash granite massif (Middle Ural) and the gold mineralization connection with it. *Izvestiya Akademii nauk USSR. Seriya geologicheskaya* [News of the USSR Academy of Sciences. Geology series], no. 6, pp. 86–90. (*In Russ.*)
6. Samartsev I. T., Zakhvatkin V. A., Kazimirsky V. F., Mikhailova L. V., Biryukov V. F. 1973, On the zonality of the Berezovskoe gold ore deposit in the Middle Urals. *Geologiya rudnikh mestorozhdeniy* [Geology of ore deposits], no. 1, pp. 110–117. (*In Russ.*)
7. Bortnikov N. S., Sazonov V. N., Vikent'eva O. V., Vikent'ev I. V., Murzin V. V., Naumov V. B., Nosik L. P. 1998, The role of magmatogene fluids in forming Berezovskoe mesothermal gold-quartz deposit, Ural. *Doklady Akademii nauk* [Reports of the Academy of Sciences], vol. 363, no. 1, pp. 82–85. (*In Russ.*)
8. Baksheev I. A., Prokof'ev V. Yu., Ustinov V. I. 2001, Genesis of metasomatic rocks and mineralized veins at the Berezovskoe deposit, Central Ural: Evidence from fluid inclusion and stable isotopes. *Geochemistry International*, vol. 39, no. 9, pp. 129–144.
9. Vikent'eva O. V., Bortnikov N. S., Vikentyev I. V., Groznova E. O., Lyubimtseva N. G., Murzin V. V. 2017, The Berezovsk giant intrusion-related gold-quartz deposit, Urals, Russia: Evidence for multiple magmatic and metamorphic fluid reservoirs. *Ore Geology Reviews*, vol. 91, pp. 837–863. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.08.018>
10. Pribavkin S. V., Montero P., Bea F., Fershtater G. B. 2013, U–Pb age and composition of the rocks of Berezovskoe gold field (Middle Ural). *Litosfera* [Lithosphere], no. 1, pp. 136–145. (*In Russ.*) <https://elibrary.ru/qbxafj>
11. Kleimenov D. A. [et al.]. 2006, Famous deposits of the Urals. Part 1. Ekaterinburg, 240 p. (*In Russ.*)
12. Prokof'ev V. Yu., Naumov V. B., Mironova O. F. 2018, Physical and chemical parameters and geochemical peculiarity fluids Paleozoic gold ores deposits. *Geokhimiya* [Geochemistry], no. 12, pp. 1141–1157. (*In Russ.*) <https://doi.org/10.1134/S0016752518120087>

✉ gpdvornik@yandex.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-9013-2223>

13. Boitsov V. E., Pilipenko G. N., Solodov N. A. 1999, Precious, radioactive and rare metals deposits. Moscow, 220 p. (*In Russ.*)
14. Benevol'skiy B. I. 2002, Gold of Russia: Problems of Use and Replacement of Mineral Resources base. 2nd Revised Edition. Moscow, 464 p. (*In Russ.*)
15. 2019, Extrative possibility subsoil. Editor-in-chief I. V. Egorova. Moscow, 544 p. (*In Russ.*)
16. Spiridonov E. M. 1996, Granitic rocks and gold mineralization of North Kazakhstan. Granite-related ore deposits of Central Kazakhstan and adjacent areas. St. Petersburg, pp. 197–217.
17. 2004, Atlas of minerals deposit models (Republic of Kazakhstan). Almaty, 141 p.
18. Thompson J. F. H., Sillitoe R. H., Baker T., Lang J. R., Mortensen J. K. 1999, Intrusion-related gold deposits associated with tungsten-tin provinces. *Mineralium Deposita*, vol. 34, pp. 323–334. <https://doi.org/10.1007/s001260050207>
19. Bortnikov N. S., Prokof'ev V. Yu., Razdolina N. V. 1996, Origin of the Charnitan gold-quartz deposit (Uzbekistan). *Geology of Ore Deposits*, vol. 38, no. 3, pp. 208–226.
20. Ebert S., Dodd S., Petsel S. 2000, The Donlin Creek Au–As–Sb–Hg deposit, southwestern Alaska: Geology and Ore Deposits 2000: The Great Basin and Beyond, Geological Society of Nevada Symposium proceedings. Nevada, USA, pp. 1069–1081.
21. Goldfarb R. J., Baker T., Dube B., Groves D. I., Hart C. J. R., Gosselin P. 2005, Distribution, Character and Genesis of Gold Deposits in Metamorphic Terranes. Economic Geology 100th Anniversary volume. Littleton, Colorado, USA, pp. 407–450. <https://doi.org/10.5382/AV100.14>
22. Dvornik G. P., Oshchukova S. L. 2009, Distribution thickness, gold and silver content in colour veins of Berezovskoe gold ore deposit. *Vestnik Ural'skogo otdeleniya Rossiiskogo mineralogicheskogo obshchestva* [Bulletin of the Ural branch of Russia Mineralogical Society], issue 6, pp. 34–40. (*In Russ.*)
23. Dvornik G. P., Shalaginova I. A., Kubakaeva I. P. 2010, Distribution gold and silver content in mineralized dikes granitoids of Berezovskoe gold ore deposit. *Vestnik Ural'skogo otdeleniya Rossiiskogo mineralogicheskogo obshchestva* [Bulletin of the Ural branch of Russia Mineralogical Society], issue 7, pp. 42–52. (*In Russ.*)
24. Dvornik G. P., Imamutdinov E. V. 2022, Distribution gold and silver content in ores of Andreevskaya and Il'inskaya mineralized dikes of granitoids of Berezovskoe deposit. *Problemy mineralogii, petrografii i metallogenii* [Problems of mineralogy, petrography and metallogeny]. Science readings of memory P. N. Chirvinsky: collection of science articles. Perm, issue 25, pp. 55–63. (*In Russ.*) <https://doi.org/10.17072/chirvinsky.2022.55>
25. Dvornik G. P. 2011, Estimation changeability of gold and silver content in ores and their quality by prospecting and development gold ore deposits. *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal* [News of the Higher educational institutions. Mining Journal], no 3, pp. 120–125. (*In Russ.*)
26. Myagkov V. F. 1984, Geochemical method paragenetic analysis of the ores. Moscow, 128 p. (*In Russ.*)
27. Kaputin Yu. E. 2002, Mining computer technology and geostatistics. St. Petersburg, 424 p. (*In Russ.*)
28. Abzalov M. 2016, Applied mining geology. Swizerland: Springer international Publishing, 448 p.
29. Rundquist D. V., Nezhensky I. A. 1975, Zonality of endogenous ore deposits. Moscow, 236 p. (*In Russ.*)
30. Sazonov V. N., Ogorodnikov V. N., Polenov Yu. A. 2008, Vertical metasomatic zonality and their meaning for prediction the blind mineralization and estimation perspective development deposits on the depth (on example gold ore and gold-polymetallic deposits). *Litosfera* [Lithosphere], no. 1, pp. 77–89. (*In Russ.*)
31. Rafailovich M.S. 2013, Vasilkovskoye deposit as an example of large-volume gold-sulphide-quartzes stokworks of the world-class. *Izvestiya akademii nauk respubliki Kazakhstan. Seriya geologicheskikh i tekhtonicheskikh nauk* [News of the Academy of sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of geology and technical sciences], no. 4, pp. 16–28.
32. Konstantinov M. M., Vargunina N. P., Kosovets T. N., Simakin G. S., Shishakova L. N. 1998, Mineralogical and geochemical zonality gold ore deposits. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy* [Geology of ore deposits], vol. 40, no. 1, pp. 20–34. (*In Russ.*)
33. Polenov Yu. A., Ogorodnikov V. N., Babenko V. V. 2015, The Berezovskoe gold deposit is a unique object of polychronous and polygenic ore formation. Ekaterinburg, 150 p. (*In Russ.*)
34. Babenko V. V. 1978, Structural condition of placement and zonality mineralization Berezovskoe deposit (Ural). *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Geologicheskaya seriya* [News of the USSR Academy of Sciences. Geology series], no. 10, pp. 114–126. (*In Russ.*)
35. Barannikov A. G. 2019, Berezovskoe gold deposit: problems of formation and further study. *Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta* [News of the Ural State Mining University], issue 4 (56), pp. 39–52. (*In Russ.*) <https://doi.org/10.21440/2037-2091-2019-4-39-52>
36. Sazonov V., Smirnov V. 2000, The Shartash granitic pluton and Berezovsky gold deposit. International Geology Field Conference in the Urals, Russia: Excursion Guidebook. London, pp. 20–31.
37. Zhelobov P. P. 2002, About inter connection mantle and upper crust processes by forming of Berezovskoe ore gold field (Middle Ural). *Izvestiya Ural'skoy gorno-geologicheskoy akademii* [News of the Ural State Mining Geological Academy], issue 15, pp. 12–17. (*In Russ.*)
38. Kuzovkov G. N., Dvoeglazov D. A. 2002, On the astenolite model of the Middle Urals and the structure of the Shartashskaya gold ore vortex structure. *Rudy i metally* [Ores and Metals], no. 4, pp. 63–72. (*In Russ.*)
39. Zhelobov P. P. 1972, Role hyperbasic in locating colour veins on the Berezovskoe ore field. *Problemy obrazovaniya rydnykh stolbov* [Problems of formation ore pole]. Novosibirsk, pp. 199–210. (*In Russ.*)
40. Babenko V. V., Polenov Yu. A., Ogorodnikov V. N. 2016, The role of intrusive magmatism in the genesis of the Berezovskoe gold ore deposit (Middle Ural). *Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo uneverситeta* [News of the Ural State Mining University], issue 1(41), pp. 39–49. (*In Russ.*)

The article was received on May 30, 2023

Геохимическая характеристика пород и изотопное датирование циркона из дайки андезитов рудянской толщи (D₂rd) Восточной зоны Среднего Урала

Василий Станиславович ЧЕРВЯКОВСКИЙ^{1*},
Евгений Александрович СЛОБОДЧИКОВ²
Мария Владимировна ЧЕРВЯКОВСКАЯ¹
Надежда Николаевна ФАРРАХОВА¹
Елена Николаевна ВОЛЧЕК^{1**}

¹Институт геологии и геохимии им. акад. А. Н. Заварицкого УрО РАН, Екатеринбург, Россия

²Уральский государственный горный университет, Екатеринбург

Аннотация

Актуальность. Субвулканические образования рудянской толщи среднего девона (D₂rd) в пределах Восточной зоны Среднего Урала имеют широкое распространение. Они представлены разнообразными по составу малыми телами, силлами и дайками, образующими с коагматичными вулканогенными породами базальт-андезит-дацитовый комплекс, формирование которого связано с вулканической деятельностью, происходившей в среднем девоне в обстановке, близкой к современным островным дугам. Их геохимическая характеристика и изотопное датирование весьма актуальны для уточнения состава, объема и палеогеодинамической обстановки формирования вулкаников. Многочисленные субвулканические тела базальтов, андезибазальтов, андезитов, дацитов и риолитов рудянской толщи наблюдаются в разрезах по берегам р. Пышмы. В статье приводятся новые данные по геохимии андезитов дайки из расположенного здесь массива вулканических пород Дивий Камень и возрасту циркона из них.

Методы. Химические анализы вулкаников выполнялись в центре коллективного пользования «Геоаналитик» Института геологии и геохимии УрО РАН (г. Екатеринбург) рентгеноспектральным флуоресцентным методом и методом ICP-MS. Цирконы изучались на сканирующем электронном микроскопе JSM-6390L фирмы Jeol и на электронно-зондовом микроанализаторе Cameca SX100. Данные по изотопам U и Pb, а также элементам-примесям в зернах циркона получены методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой с лазерной абляцией (LA-ICP-MS) на квадрупольном ИСП-МС NexION 300S с приставкой для лазерной абляции LA NWR 213.

Цель исследований – получение новых данных по геохимическому составу и возрасту андезитов дайки в разрезе по р. Пышме.

Результаты. Дайка андезитов пересекает среднеобломочные неслоистые туфы и наклонно залегающий фрагмент лавового потока порфирирового дацита. Андезиты представляют собой порфирировые породы с 20–30 % вкрапленников измененного плагиоклаза. Они умеренно калиевые, высокоглиноземистые, низкотитанистые. По сравнению со средними океаническими толеитами (N-MORB) они обогащены Rb, K, Ba, Sr, Th и обеднены Y, Ti, Zr, Hf. На нормализованной многокомпонентной диаграмме проявлен Ta-Nb минимум. Спектры распределения редкоземельных элементов (РЗЭ) для зерен циркона показывают увеличение содержания от легких к тяжелым РЗЭ, положительную Ce и отрицательную Eu аномалию. Впервые методом LA-ICP-MS проведено геохронологическое исследование цирконов из андезитов. Выявлено 4 возрастные группы цирконов, млн лет: 390–387; 369–362; 337–345; 327–329.

Выводы. Полученные данные свидетельствуют о том, что андезиты формировались в надсубдукционной обстановке, а магматическому этапу становления пород, отвечают верхнедевонские разновидности цирконов. Ранне-среднекаменноугольные датировки могут быть связаны с тепловым воздействием, возникшим при внедрении более поздней дайки долеритов.

Ключевые слова: Восточная зона Урала, рудянская толща, массив Дивий Камень, дайка, андезит, геохимическая характеристика, циркон, изотопный возраст.

Введение

Образования рудянской толщи (D₂rd) на востоке Среднего Урала слагают разрезы локальных тектонических блоков. Они представлены различными соотношениями эффузивных, пирокластических и осадочных пород, возраст которых принят среднедевонским на осно-

вании находок верхнеэфельско-раннеживетской фауны в известняках и кремнистых отложениях. Ранее их относили к базальт-андезит-дацит-липаритовой формации, базальт-дацитовой толще, а также к базальт-андезит-риолитовому комплексу [1–3].

✉ v.chervyakovskiy@mail.ru

**volchek@igg.uran.ru

кообломочные литокристаллокластические туфы андезитобазальтового состава; 12 – мелкообломочные литокристаллокластические туфы андезитобазальтового состава с редкими крупными обломками; 13 – туфолавы и лавобрекчии андезитобазальтового состава; 14 – туфы и туфолавы; 15 – андезиты; 16 – разрывные нарушения, надвиги; 17 – разрывные нарушения: установленные (а), предполагаемые (б); 18 – установленные геологические границы; 19 – предполагаемые геологические границы; 20 – элементы залегания слоистости; 21 – зоны закалывания; 22 – номера даек, упоминаемые в тексте

Figure 1. Section of the volcanogenic part of the strata: diagrams: а – geological structure of the territory of the Pyshma river basin (compiled from [4] with additions by the authors); 1 – albitized and chloritized aphyric basalts (D_2); 2 – lavas and basalt tufts (D_2); 3 – lavas and tufts of basalts, andesites, dacites and rhyolites (D_2ef); 4 – clayey-siliceous shales (D_2gv); 5 – shales and siltstones (D_2f); 6 – clay shales, siltstones, sandstones (а), trachybasalts, trachyrhyolites and their tufts, tuff sandstones, tuff gravestones and tuff conglomerates at the base (б) (C_1bk); 7 – clayey shales, siltstones, sandstones with interlayers of conglomerates, gravelites and coals (C_1eg+br); 8 – layered and massive limestones with interlayers of shales and marls (C_1is); intrusive formations: 9 – gabbro-diorites ($v\delta S_2r$); 10 – vein plagiogranites ($p\gamma S_2r$); subvolcanic formations: 11 – basaltic andesites ($\alpha\beta D_2$); 12 – andesites (αD_2); 13 – rhyolites and rhyodacites (λD_2); 14 – vents of the central (а) and fissure (б) types (αD_2); 15 – gabbro-dolerite and dolerite dikes (βC_1); 16 – reef limestones; 17 – sandstones and siltstones; 18 – discontinuity faults: established (а), suspected (б); 19 – rock shear zones; 20 – location of the Diviy Kamen massif; б – geological structure of the Diviy Kamen rock; scale 1: 500 (compiled by the authors): 1 – alluvial deposits; 2 – dolerite dike; 3 – subvolcanic body of rhyolites; 4 – andesite dike; 5 – subvolcanic dacite body; 6 – subvolcanic body of andesites; 7 – agglomerate tufts of the vent facies; 8 – heteroclastic lithocrystalline tufts; 9 – clastolavas of andesite-basaltic and andesite composition; 10 – medium-fine clastic lithocrystalline tufts of andesite-basaltic composition; 11 – fine-clastic lithocrystalline-clastic tufts of andesite-basaltic composition; 12 – fine-clastic lithocrystalline-clastic tufts of andesite-basaltic composition with rare large fragments; 13 – tuff lavas and lava-breccias of andesite-basaltic composition; 14 – tufts and tuff lavas; 15 – andesites; 16 – faults, thrusts; 17 – discontinuity faults: established (а), suspected (б); 18 – established geological boundaries; 19 – estimated geological boundaries; 20 – elements of bedding; 21 – hardening zones; 22 – numbers of dikes mentioned in the text

Наиболее информативный разрез вулканогенной части толщи находится в бассейне р. Пышмы на отрезке от устья р. Рефт до устья р. Шаты. Именно по расположенному на данной территории поселку Рудянский толща получила свое название. Здесь наблюдается сложное чередование лав и туфов андезитов, андезитобазальтов, базальтов, дацитов, риолитов, туфоконгломератов, туфогравелитов, туфопесчаников, туффитов (рис. 1, а). Преобладающими в разрезе являются слоистые туфы базальтов, андезитобазальтов и андезитов размерностью от агломератовых до мелкообломочных. Агломератовые туфы содержат включения сплюснутых и шаровидных бомб [1, 4]. Соответствующие им лавы менее распространены, местами они имеют подушечное строение. Пирокластические образования дацитового, риодацитового и риолитового состава, представленные мелкообломочными, лапиллиевыми и бомбовыми туфами, распространены ограниченно. Порфирные лавы кислого состава образуют экструзии и небольшие потоки с лавобрекчиями в краевых частях [1]. На представленной схеме геологического строения лавы и туфы не разделялись (рис. 1, а).

Характерным для геологического строения этого участка является наличие большого количества субвулканических тел, экструзий, силлов, даек, представленных базальтами, андезитобазальтами, андезитами, дацитами и риолитами. Значительная часть таких интрузивных тел приурочена к тектоническим нарушениям субмеридионального и субширотного направлений. Иногда они имеют в плане хорошо выраженные кольцевые формы [4].

В пределах развития вулканогенной толщи при проведении геолого-съёмочных работ выделялась Рудянская вулканотектоническая структура и четыре осложняющих ее вулканических жерловины [4]. Более поздними исследованиями в районе течения р. Пышмы и ее притоков были реконструированы палеозойские вулканические постройки центрального типа, среди которых стратовулкан Дивий Камень.

Стоит отметить, что изучение геологического строения этой территории имеет длительную историю, неразрывно связанную с историей Уральского государственного горного университета и именами

преподавателей геологических специальностей, так как здесь находится учебный геологический полигон для студентов вуза.

Изотопные датировки и геохимические характеристики для вулканогенных образований рудянской толщи, способствующие уточнению схемы расчленения вулканических и палеогеодинамической обстановки их формирования, имеются в небольшом количестве [5, 6]. Нами были получены новые геохимические данные для андезитов дайки в скальном массиве Дивий Камень ($56^{\circ}58'21''$ с. ш., $61^{\circ}56'32''$ в. д.) и определен возраст цирконов из этих образований.

Методы исследования

Химические анализы вулканических образований выполнялись в центре коллективного пользования «Геоаналитик» Института геологии и геохимии УрО РАН (г. Екатеринбург) рентгеноспектральным флуоресцентным методом и методом ICP-MS. Цирконы изучались на сканирующем электронном микроскопе JSM-6390L фирмы Jeol и на электронно-зондовом микроанализаторе Cameca SX100. Данные по изотопам U и Pb, а также элементам-примесям в зернах циркона получены методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой с лазерной абляцией (LA-ICP-MS) на квадрупольном ICP-MS NexION 300S с приставкой для лазерной абляции LA NWR 213. Используемое оборудование размещено в помещении класса чистоты 7 ИСО. Процедура измерения Pb/U изотопных отношений и алгоритм расчета возраста приведены в работе [7]. Параметры приставки для лазерной абляции следующие: диаметр кратера – 25 мкм, частота повторения импульсов – 10 Гц, плотность энергии – 12,5–13,5 Дж/см². Результаты обрабатывались в программе GLITTER V4.4. Корректировка присутствия общего свинца проведена в программе ComPbCorr [8]. Построение конкордии выполнено в макросе для Excel Isoplot v.4.15. В качестве первичного стандарта, измеренного методом «взятия в вилку» через 10 измерений, использовали циркон GJ (в качестве вторичных – цирконы 91500 и Plesovice). U–Pb возраст для стандартов GJ и Plesovice составляет 601 ± 2 (1 σ) и 338 ± 2 (1 σ) млн лет соответственно в рамках данной измерительной сессии.

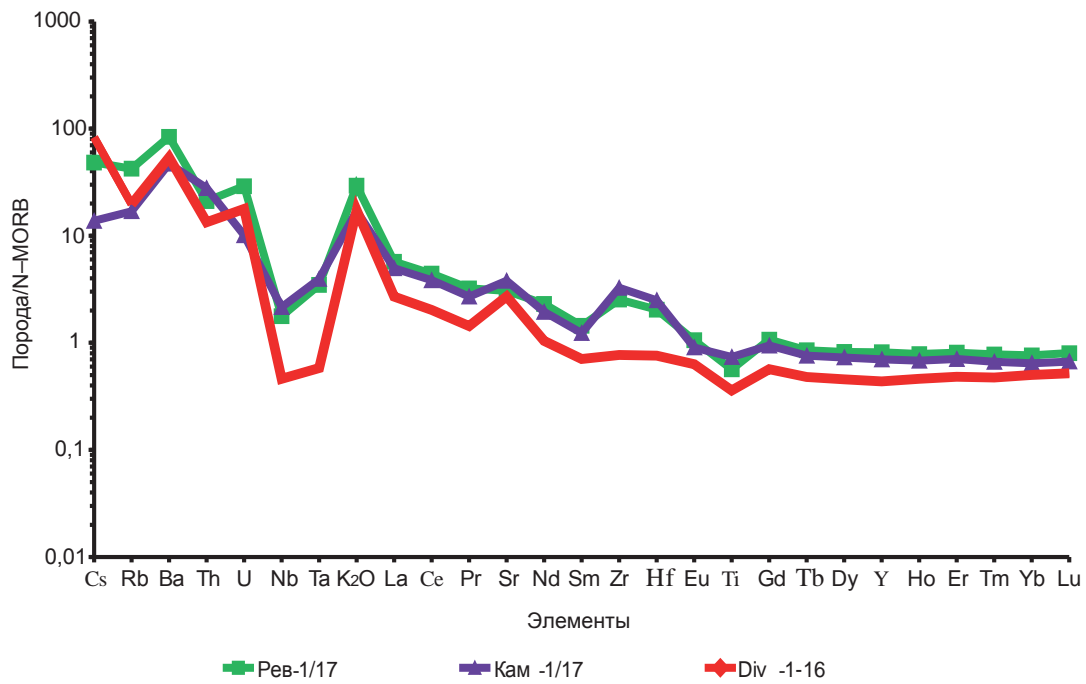


Рисунок 2. Спектры распределения редких элементов в андезите скалы Дивий Камень (Div-1-16) и раннекаменноугольных вулканитах р. Исеть (Кам-1/16, Рев-1/16) Восточной зоны Среднего Урала. Содержания элементов, нормированы к N-MORB [10]
Figure 2. Distribution spectra of trace elements in the andesite of the Diviy Kamen rock (Div-1-16) and Early Carboniferous volcanics of the river Iset (Kam-1/16, Rev-1/16) of the Eastern zone of the Middle Urals. Element contents normalized to N-MORB [10]

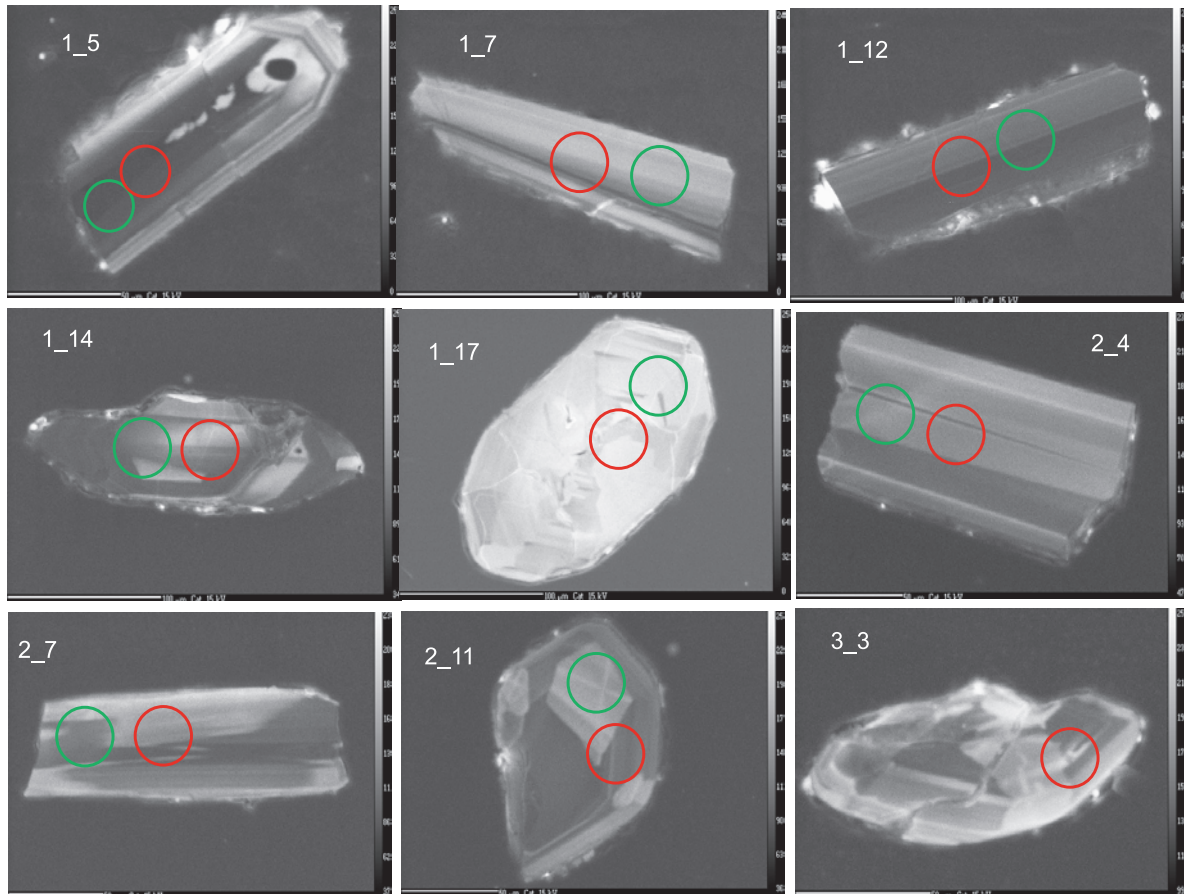


Рисунок 3. Катодолуминесцентные изображения цирконов из андезитов с аналитическими кратерами. Зеленый цвет кружка – РЭЭ, красный – возраст
Figure 3. Cathodoluminescence images of zircons from andesites with analytical craters. Green circle – REE, red – age

Выделение монофракции циркона выполнялось по стандартной схеме, включающей прежде всего дробление горной породы до < 0,25 мм и отмывку полученной пробы. Немагнитная фракция разделена в тяжелой жидкости (бромформ). Концентрат для выделения зерен цирконов под бинокулярным микроскопом получен с помощью электромагнитной сепарации. Для дальнейшего исследования зерна цирконов были помещены в оксидную шашку.

Петрогеохимическая характеристика пород и результаты датирования цирконов из андезитов массива Дивий Камень. Массив вулканических пород Дивий Камень расположен на левом склоне долины р. Пышмы, в месте ее резкого изгиба и смены направления течения с широтного на меридиональное (рис. 1, а). Массив является основным реликтом стратовулкана, относимого к этно-везувианскому типу вулканов с преобладающей эксплозивной стадией извержения. Это подтверждается широким развитием вулканогенно-обломочных пород и незначительным распространением в разрезе эффузивных фаций.

Скальный массив имеет отвесные склоны и сглаженную вершинную поверхность. С севера выходы пород срезаются субширотной долиной небольшого ручья, проходящего по разлому. С юга обнажение пересекается логом также субширотной ориентировки с редкими небольшими осыпями на крутых склонах. Здесь наблюдаются

небольшие выходы коренных пород. Длина скального массива составляет около 230 м при максимальной высоте 40 м. Его центральная часть на протяжении ≈ 170 м имеет крутой склон, труднодоступный для наблюдения. В его северной части (северо-западный угол карты) наблюдается переслаивание крупно-, средне- и мелкообломочных туфов, имеющих юго-восточное падение (рис. 1, б).

Слоистую толщу туфов протыкает неск, сложенный андезитобазальтовыми агломератовыми туфами с крупными обломками плагиофировых андезитов и порфировых дацитов. Неск дугой, выпуклой к юго-западу, окаймляет вершину обнажения. В поперечном сечении он имеет овальную форму с длинной осью, ориентированной в северо-северо-восточном направлении и размер в ширину около 60 м.

К северо-западу от неск и у его южной окраины закартированы две дайки андезитового состава. Дайка I мелкопорфирового андезита мощностью 1 м расположена западнее северного закругления неск (рис. 1, б), она имеет субвертикальное залегание при северо-восточном простирании. Дайка пересекает среднеобломочные неслоистые туфы, наклонно залегающий фрагмент лавового потока порфирового дацита и имеет четкие эндоконтактные зоны закалывания. Массивная порода дайки серо-зеленого цвета содержит небольшое количество пор вдоль контактов и обладает мелкопорфировой структурой. Во вкрапленниках развит плагиоклаз.

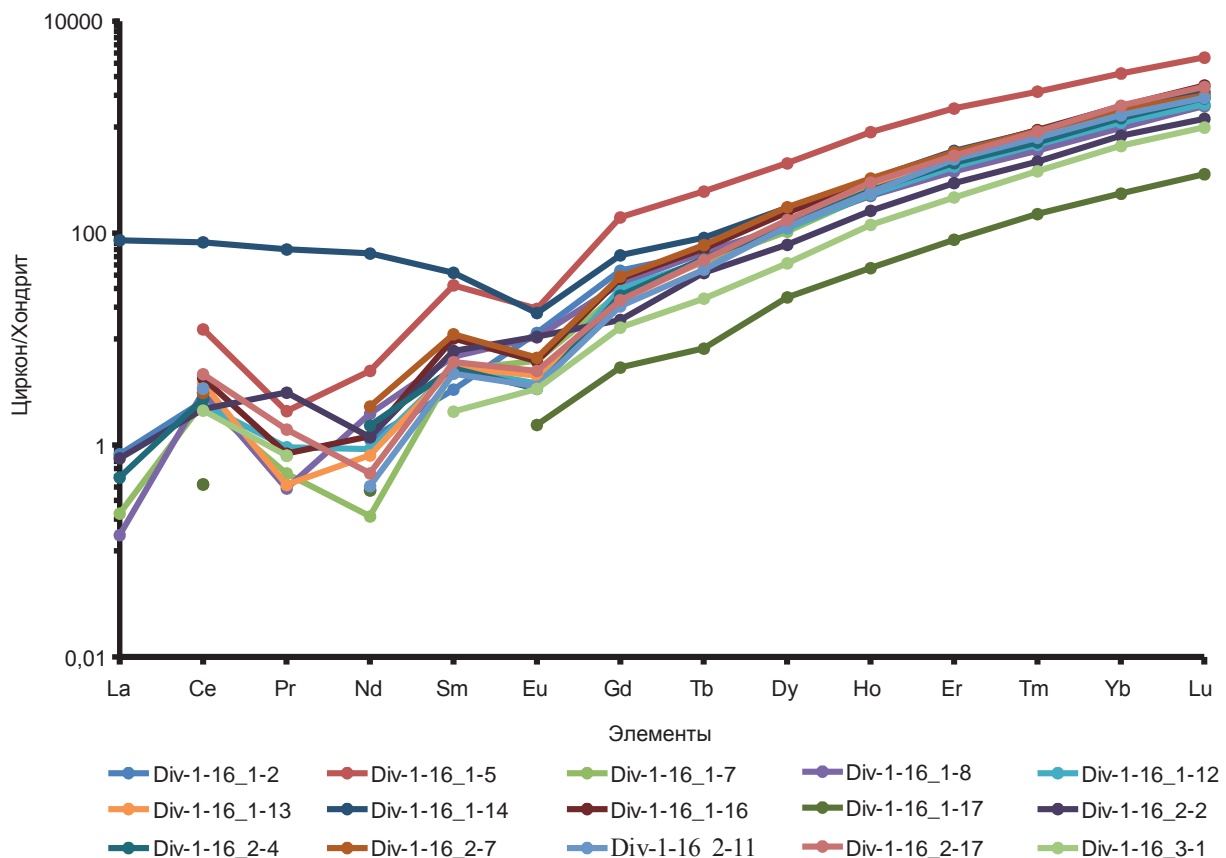


Рисунок 4. Спектры распределения редкоземельных элементов в цирконах из андезитов скалы Дивий Камень. Нормировано к хондриту по [10]. Номера цирконов на рисунке соответствуют номерам в табл. 1

Figure 4. Distribution spectra of rare earth elements in zircons from andesites of the Diviy Kamen rock. Normalized to chondrite according to [10]. The zircon numbers in the figure correspond to the numbers in table 1

Дайка 2 мелкопорфирового андезита, рассекающая в верхней части склона южную оконечность некка, имеет прямую форму и вертикальное залегание. В нижней части склона дайка резко изгибается, используя контакт туфов, а затем рассекает последние по трещине, азимут падения $265 \angle 80^\circ$.

Породы дайки 1 по петрохимическому составу соответствуют андезитам нормальной щелочности ($\text{SiO}_2 = 59,3$ мас. %, $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} = 4,6$ мас. %). Они высокоглиноземистые ($\text{Al}_2\text{O}_3 - 14,67$ мас. %), низкотитанистые ($\text{TiO}_2 - 0,44$ мас. %). По содержанию K_2O являются умеренно калиевыми (1,04). Содержание редкоземельных элементов (РЗЭ) составляет 42 г/т, величина $\text{La}_n/\text{Yb}_n - 2,95$. Дефицит европия не проявлен ($\text{Eu}_n/\text{Eu}_n^* = 1$). Особенности распределения элементов-примесей в вулканите заключаются в преобладании крупноионных элементов (Rb, Ba, Th, K) над высокозарядными (Zr, Hf и тяжелыми РЗЭ). Сопоставление изученных андезитов с аналогичными по составу образованиями раннекаменноугольного возраста, формирование которых связывается с режимом активной континентальной окраины, показало, что содержания K_2O , РЗЭ и элементов с высоким ионным потенциалом (Ta, Nb, Zr, Hf, Y, Yb) в них ниже, чем в раннекаменноугольных андезитах [9]. На нормализованной по отношению к N-MORB многокомпонентной диаграмме в исследованной породе наблюдается положительная аномалия по Sr, практически отсутствует аномалия по Zr-Hf, вырисовывается отчетливый Ta-Nb минимум, более глубокий, чем в андезитах раннего карбона (рис. 2). Отношение Th/Yb и Ta/Yb в андезитах составляет соответственно 1,05 и 0,05. Такие геохимические характеристики, а также низкое содержание титана свойственны надсубдукционным островодужным образованиям. Однако по сравнению с ними изученные породы имеют более высокое значение отношения Zr/Y (4,67) и содержание Zr, что характерно для пород, развитых вблизи континентальных окраин.

Из отобранной пробы (Div-1-16) было выделено 30 цирконов. Это мелкие (50–100 мкм) прозрачные зерна, желтоватого цвета. Среди них есть удлиненные и изометричные, а также обломки. Удлиненные кристаллы тригональные, в них наблюдается полосчатая зональность, что хорошо видно на CL-изображениях (рис. 3).

Полученные геохимические данные по цирконам показали, что большая их часть представлена неизменными кристаллами. По характеру распределения РЗЭ они соответствуют цирконам магматического генезиса (табл. 1) [11]. В спектрах РЗЭ отмечается преобладание тяжелых редкоземельных элементов над легкими, положительная Ce и отрицательная Eu аномалии ($\text{Lu/La}_n = 1601-11283$, $\text{Ce/Ce}^* - 13-24$, $\text{Eu/Eu}^* - 0,3-0,9$ (рис. 4). Содержание Ca

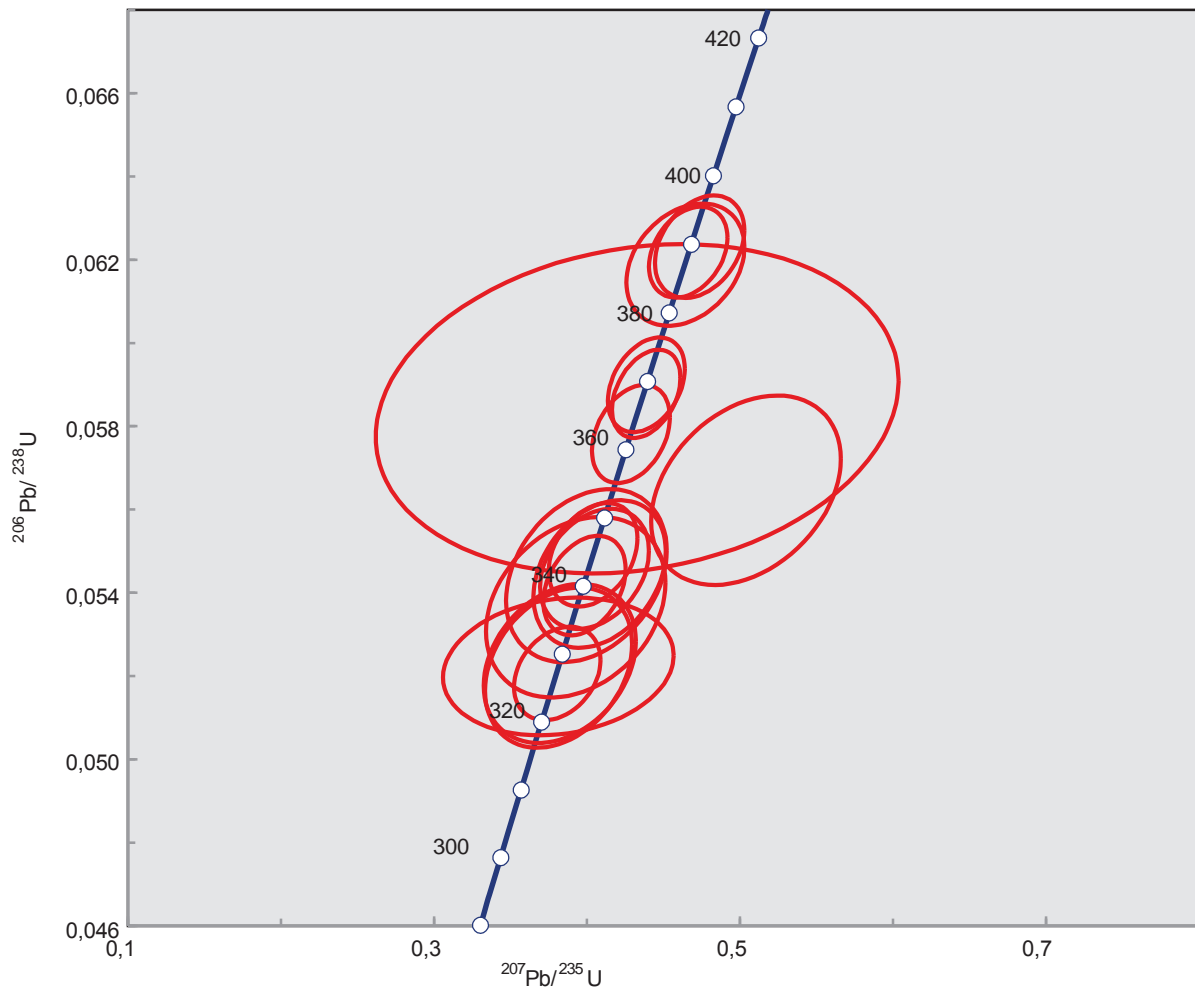


Рисунок 5. Диаграмма с конкордией $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ и $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ для зерен цирконов из андезитов скалы Дивий Камень
 Figure 5. Diagram with concordia $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ and $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ for zircon grains from andesites of the Diviy Kamen rock

Таблица 1. Содержание микроэлементов в цирконах из андезитов, г/т
Table 1. Content of microelements in zircons from andesites, g/t

Элемент	Номера точек измерений														
	Div-1-16_1-2	Div-1-16_1-5	Div-1-16_1-7	Div-1-16_1-8	Div-1-16_1-12	Div-1-16_1-13	Div-1-16_1-14	Div-1-16_1-16	Div-1-16_1-17	Div-1-16_2-2	Div-1-16_2-4	Div-1-16_2-7	Div-1-16_2-11	Div-1-16_2-17	Div-1-16_3-1
La	0,58	< ПО	0,16	0,1	< ПО	< ПО	60,67	< ПО	< ПО	0,53	0,35	< ПО	< ПО	< ПО	< ПО
Ce	4,76	22,68	4,62	5,8	4,44	6,96	150,32	7,85	0,78	4	4,99	5,72	6,24	8,54	3,88
Pr	< ПО	0,58	0,15	0,108	0,265	0,117	19,54	0,231	< ПО	0,87	< ПО	< ПО	< ПО	0,39	0,221
Nd	1,55	6,83	0,29	2,7	1,25	1,09	87,83	1,65	0,51	1,62	2,09	3,15	0,56	0,74	< ПО
Sm	1,48	14,26	2,25	3,03	2,34	2,4	18,76	4,51	< ПО	3,43	2,34	4,93	2,09	2,69	0,92
Eu	1,92	3,24	1,05	1,75	0,64	0,76	2,96	1,04	0,26	1,77	0,57	1,12	0,6	0,84	0,57
Gd	26,35	83,86	16,4	19,8	17,73	13,93	36,74	22,11	3,21	9,01	15,33	23,11	12,16	13,86	7,65
Tb	7,03	26,68	5,72	7,05	5,87	5,88	9,74	7,7	0,88	4,55	6,21	8,32	4,87	6,02	2,6
Dy	86,41	336,45	76,04	85,8	81,55	94,43	127,62	115,35	18,24	57,27	87,76	129,41	84,76	97,95	38,28
Ho	42,45	146,33	38,23	36,57	37,8	44,56	52,42	49,01	7,63	26,51	41,12	53,46	39,41	48,8	19,47
Er	226,83	720,17	187,45	182,9	202,66	248,55	286,44	271,2	41,53	142,13	219,67	278,82	238,36	257,85	103,99
Tm	49,49	160,28	44,63	44,31	50,48	62,51	68,72	69,61	11,22	35	53,18	68,03	58,79	67,02	28,4
Yb	590,3	1542,24	514,41	473,5	532,03	691,74	730,83	755,61	113,54	398,19	586,03	696,39	624,81	766,92	319,71
Lu	143,12	337,09	116,35	117,93	121,95	159,16	157,38	183,03	26,65	88,71	138,92	147,9	140,08	177,45	73,63
Ca	1681,41	< ПО	775,01	< ПО	< ПО	< ПО	36882	< ПО	< ПО	< ПО	< ПО	< ПО	< ПО	1392,72	< ПО
Ti	51	7,55	4,94	< ПО	7,69	< ПО	14,22	< ПО	6,6	8,02	20,8	< ПО	9,89	12,37	< ПО
Sr	6,5	< ПО	< ПО	0,37	< ПО	< ПО	36,91	< ПО	< ПО	1,92	< ПО	0,68	0,91	5,52	< ПО
Y	1464	4627	1259	1214	1316	1544	1802	1722	293	910	1398	1763	1359	1680	646
Zr	620 161	625 299	656 096	617 931	608 227	566 131	595 876	544 055	555 890	542 678	577 393	611 268	539 134	604 784	532 612
Nb	< ПО	1,7	0,46	< ПО	0,6	0,92	< ПО	1,27	< ПО	2,21	< ПО	0,68	1,49	1,92	< ПО
Ta181	< ПО	0,368	0,57	0,232	0,249	0,226	< ПО	0,331	< ПО	1,07	< ПО	< ПО	0,354	0,22	0,27

Примечание: < ПО – значение ниже предела обнаружения.

в них колеблется в пределах 775–1681 г/т, Sr – 0,35–6,5 г/т. Кристалл Div-1-14 имеет повышенное содержание легких редких земель по сравнению с остальными зернами ($(Lu/La)_n = 24,8$, $Ce/Ce^* = 1,9$, $Eu/Eu^* = 0,3$), что свидетельствует об изменении этого циркона [12]. Содержание Ca в нем составляет 36882 г/т, Sr – 36,91 г/т. в остальных зернах циркона – 775–1681 г/т (Ca), 0,68–6,5 г/т (Sr). Циркон Div-1-2 можно считать частично измененным, для него характерно более низкое отношение Sm_n/La_n (4,06), чем в магматических разностях (10,32–48,32), и более высокое, чем в зерне Div-1-14 (0,49). По соотношению U/Yb и Y все цирконы соответствуют цирконам континентальной коры [13].

Результаты датирования цирконов приведены в табл. 2 и на рис. 5. Полученные возрасты ($^{206}Pb/^{238}U$) лежат в интервале от 390 до 327 млн лет. На диаграмме $^{206}Pb/^{238}U$ – $^{207}Pb/^{235}U$ точки анализов располагаются на конкордии и образуют четыре возрастные группы (рис. 5). Наиболее древние датировки (390–387 млн лет) имеют 3 призматических кристалла с отчетливым зональным строением. Среди них есть измененный (Div-1-14). Полученное по ним конкордантное значение возраста составляет $388,7 \pm 2,9$ млн лет при СКВО = 0,035. Цир-

коны этого возраста содержат умеренные концентрации урана (U = 190–480 г/т) и тория (Th = 59–197) при Th/U = 0,31–0,41. Другую группу образуют 4 кристалла, возраст которых определяется интервалом от 369 до 362 млн лет. Средневзвешенный $^{206}Pb/^{238}U$ – $^{207}Pb/^{235}U$ возраст по 4 точкам составил $366,8 \pm 2,6$ млн лет при СКВО = 0,0061. Содержание U и Th в них более высокое и составляет 311–742 г/т и 123–428 г/т соответственно, отношение Th/U = 0,38–0,58. Самой многочисленной является группа циркона с возрастными 337–345 млн лет. Вычисленный по ним возраст составил $341,8 \pm 2,5$ млн лет при СКВО = 0,037. Содержание урана и тория в них ниже, чем у первых двух групп, и колеблется в узких пределах (U = 194–246, Th = 60–98, Th/U = 0,27–0,40). Конкордантное значение возраста, полученное для еще одной группы цирконов по 4 точкам, составляет $327,8 \pm 3,1$ млн лет при СКВО = 0,00077.

Обсуждение. Прежде чем интерпретировать результаты датирования цирконов, полученные U–Pb методом, обратимся к геологическим данным. В обнажении Дивий Камень присутствуют субвулканические тела порфировых дацитов и афировых риолитов. Дациты прижерлового тела содержат обломки андезитов, андезибазальтов

Таблица 2. U–Pb изотопные данные для цирконов из андезитов
Table 2. U–Pb isotope data for zircons from andesites

Зерна и кратеры	Изотопные отношения				RHO	Возраст, млн лет				Концентрации, г/т							
	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1s		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1s	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1s	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1s	Pb ₂₀₆	U ₂₃₈	Th/U			
Div-1-16_1-2	0,05304	0,00437	0,38242	0,03280	0,05230	0,00126	0,28	176	329	24	329	329	8	65,01	280,92	104,64	0,37
Div-1-16_1-3	0,05329	0,00443	0,39972	0,03470	0,05441	0,00137	0,29	178	341	25	341	342	8	59,28	246,32	98,39	0,40
Div-1-16_1-5	0,05380	0,00198	0,42882	0,01682	0,05781	0,00078	0,34	79	362	12	362	362	5	189,85	742,61	428,07	0,58
Div-1-16_1-7	0,05338	0,00240	0,40408	0,01911	0,05491	0,00082	0,32	97	345	14	345	345	5	51,52	212,23	72,79	0,34
Div-1-16_1-8	0,05416	0,00170	0,43887	0,01471	0,05878	0,00070	0,36	67	369	10	369	368	4	80,93	311,56	122,88	0,39
Div-1-16_1-12	0,05515	0,00213	0,47373	0,01928	0,06231	0,00081	0,32	82	394	13	394	390	5	52,47	190,60	59,16	0,31
Div-1-16_1-13	0,05396	0,00192	0,43892	0,01662	0,05899	0,00075	0,34	76	369	12	369	369	5	82,06	315,09	120,54	0,38
Div-1-16_1-14	0,05444	0,00286	0,46444	0,02544	0,06188	0,00097	0,29	112	387	18	387	387	6	59,65	218,46	94,67	0,43
Div-1-16_1-16	0,05439	0,00188	0,46633	0,01697	0,06218	0,00072	0,32	74	389	12	389	389	4	132,02	481,29	197,33	0,41
Div-1-16_1-17	0,05375	0,01379	0,43295	0,11278	0,05842	0,00261	0,17	455	365	80	365	366	16	12,74	49,46	2,76	0,06
Div-1-16_2-1	0,05304	0,00250	0,38072	0,01871	0,05206	0,00074	0,29	101	328	14	328	327	5	139,39	607,49	252,08	0,41
Div-1-16_2-2	0,05296	0,00682	0,38142	0,04974	0,05223	0,00109	0,16	268	328	37	328	328	7	32,30	140,37	42,46	0,30
Div-1-16_2-4	0,05309	0,00503	0,39275	0,03868	0,05365	0,00143	0,27	201	336	28	336	337	9	47,62	202,14	59,51	0,29
Div-1-16_2-7	0,05384	0,00297	0,40509	0,02346	0,05457	0,00095	0,30	119	345	17	345	343	6	58,99	246,33	96,19	0,39
Div-1-16_2-11	0,05335	0,00225	0,39851	0,01775	0,05417	0,00079	0,33	91	341	13	341	340	5	46,21	194,5	60,82	0,31
Div-1-16_2-17	0,05438	0,00362	0,40833	0,02856	0,05445	0,00117	0,31	143	348	21	348	342	7	53,62	224,7	60,83	0,27
Div-1-16_3-1	0,05300	0,00422	0,38152	0,03177	0,05220	0,00127	0,29	170	328	23	328	328	8	45,12	197,34	50,15	0,25
Div-1-16_3-3	0,06474	0,00497	0,50407	0,04097	0,05646	0,00150	0,33	155	414	28	414	354	9	69,89	282,77	98,93	0,35

RHO – коэффициент корреляции отношений ²⁰⁷Pb/²³⁵U и ²⁰⁶Pb/²³⁸U.
Th/U – отношение концентраций элементов.
1s – погрешность 1σ.

и туфов. Было установлено, что субвулканические тела афировых риолитов широко развиты в эффузивно-пирокластической толще на участке от р. Рефт до скалы Дивий Камень и часто соседствуют с субвулканическими телами порфириновых дацитов. Кроме того, в этой же полосе также часто встречаются лавовые потоки афировых риолитов, переслаивающиеся со среднедевонскими туфами и лавами андезитобазальтового состава. Такие потоки можно наблюдать в долине руч. Рудянка у северо-восточной окраины с. Рудянское, в карьере на левобережье руч. Рудянка у юго-восточной окраины с. Рудянское. Лавовый поток афировых риолитов, подстилающий пачку крупнообломочных туфов, обнажается в левом склоне долины р. Пышмы, а также в верховьях руч. Сухая речка. По структуре, текстуре и вещественному составу афировые риолиты субвулканических тел идентичны излившимся афировым риолитам [5], а значит, являются комагматами. Это позволяет считать субвулканические тела афировых риолитов среднедевонскими.

По характеру пересечения субвулканических тел, сложенных афировыми риолитами и порфириновыми дацитами, закартированными в обнажении Дивий Камень, понятно, что риолиты моложе дацитов. Но их возрастное различие не выходит за пределы интервала накопления среднедевонской толщи. Это объясняется тем, что среднедевонская слоистая толща, вмещающая потоки афировых риолитов, «проткнута» некком вулкана Дивий Камень и прорвана субвулканическим телом порфиринового дацита. Значит, некк и дацит моложе этой среднедевонской туфо-лавовой толщи. Из этого следует, что туфо-лавовая толща, некк и субвулканические тела порфиринового дацита и афирового риолита имеют один и тот же среднедевонский возраст. Это подтверждается результатами определения абсолютного возраста порфиринового дацита по содержащимся в нем цирконам [6].

Изученная дайка андезитов пересекает среднеобломочные неслоистые туфы и наклонно залегающий фрагмент лавового потока порфиринового дацита, по минеральному составу и структуре аналогичного породам части обломков агломератового туфа, слагающего некк. Судя по месту расположения и составу пород, поток излился из этого же самого жерла, по которому позже извергался разнообломочный пирокластический материал, превратившийся в агломератовые туфы, т. е. возраст лавового потока среднедевонский. Центральный фрагмент этого потока и пересекается дайкой.

Вторая дайка плагиофирового андезита, рассекающая в верхней части склона южную оконечность некка, имеет в этом месте прямолинейную форму при вертикальном залегании и также северо-восточное простирание. Эта дайка обрезается дайкой долерита, возраст которой, по некоторым данным, считается послесреднедевонским [4].

Судя по соотношению даек андезита с лавовым потоком порфиринового дацита и некком, с одной стороны, и с дайкой долерита, с другой, относительный возраст даек укладывается в довольно широкий диапазон: послесреднедевонский–досреднекаменноугольный. С учетом геологических и геохимических данных цирконы возрастного интервала 369–362 млн лет можно считать соответствующими магматическому этапу становления андезитов.

Цирконы с возрастом от 345 до 337 млн лет и от 327 до 329 млн лет могут быть связаны с тепловым воздействием, возникшим при внедрении более поздней дайки долеритов.

В геологической истории развития среднеуральской части Восточной зоны эти временные интервалы соответствуют периоду возникновения и существования активной континентальной окраины [14]. Вулканические образования этого этапа представлены андезит–базальтовыми ассоциациями фаменского возраста и визейским бекленищевским базальт–андезит–дацит–риолитовым комплексом и характеризуются типичным известково-щелочным химизмом [9, 15].

Заключение

Геохимические особенности андезитов дайки из массива Дивий Камень рудянской толщи в разрезе по р. Пышме свидетельствуют, что вулканические породы формировались в надсубдукционной геодинамической обстановке. Большинство зерен циркона из андезитов относится к магматическому типу. Впервые U–Pb методом (LA–ICP–MS) получены возрастные датировки цирконов. Эти датировки совпадают с периодами вулканической активности в регионе и не противоречат геологическим данным. Возраст цирконов в андезитах, установленный в интервале 369–362 млн лет ($T_{cp} = 366,8 \pm 2,6$ млн лет), близок времени их образования. Несмотря на не крупный масштаб изученного тела, результаты исследования позволяют полагать, что среди субвулканических пород, включенных в состав рудянской толщи среднего девона, в бассейне р. Пышмы присутствуют более молодые образования. Поэтому продолжение изотопно-геохронологических исследований вулкаников в этом районе представляется весьма актуальной проблемой.

Исследования выполнены в рамках темы № АААА-А19-119072990020-6 государственного задания ИГГ УрО РАН. Дооснащение и комплексное развитие ЦКП «Геоаналитик» ИГГ УрО РАН осуществляется при финансовой поддержке гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Соглашение № 075-15-2021-680.

ЛИТЕРАТУРА

1. Коротеев В. А., Дианова Т. В., Кабанова Л. Я. Среднепалеозойский вулканизм Восточной зоны Урала. Л.: Наука, 1979. 129 с.
2. Коровко А. В., Кузовков Г. Н., Бурнатная Л. Н., Мананкова Г. П., Пуртов В. А., Брусницин В. Д., Ведерников В. В. Информационный отчет по прогнозно-поисковым работам на золото на Алапаевской площади: отчет Исетской ГСП за 2000–2002 гг. Екатеринбург: ТГФ, 2002. Кн. 1. 282 с.
3. Казаков И. И., Стороженко Е. В., Харитонов И. Н., Стефановский В. В. Отчет о результатах работ по объекту ГДП-200 листа О-41-XX (Алапаевская площадь) за 2014–2016 гг. (Государственный контракт № 1/14 от 20 февраля 2014 г.). Екатеринбург: УГСЭ, 2016. Кн. 1. 306 с. ТФГИ по УрФО.
4. Плюснин К. П., Плюснина А. А. Отчет по теме «Опытно-методические работы по созданию производственного учебного полигона по крупномасштабному геологическому картированию (Сухоложский участок)». Екатеринбург: УГСЭ, 1994. ТФГИ по УрФО.

5. Волчек Е. Н., Нечеухин В. М. Петрогеохимические особенности вулканогенных пород Сухоложской зоны (восточный сегмент Среднего Урала) и их значение для геодинамических реконструкций // Литосфера. 2012. № 3. С. 146–150.
6. Коротеев В. А., Червяковский В. С., Зайцева М. В., Волчек Е. Н., Нечеухин В. М. Первое определение изотопного возраста андезит-дацитового комплекса Восточной зоны Среднего Урала // Докл. АН. 2019. Т. 487(2). С. 174–178.
7. Зайцева М. В., Пупышев А. А., Шапова Ю. В., Вотяков С. Л. U–Pb датирование цирконов с помощью квадрупольного масс-спектрометра с индуктивно-связанной плазмой NexION 300S и приставки для лазерной абляции NWR 213 // Аналитика и контроль. 2016. Т. 20. № 4. С. 294–306. <https://doi.org/10.15826/analitika.2016.20.4.006>
8. Andersen T. Correction of common lead in U–Pb analyses that do not report ²⁰⁴Pb // Chemical Geology. 2002. Vol. 192. issue 1–2. P. 59–79. [https://doi.org/10.1016/s0009-2541\(02\)00195-x](https://doi.org/10.1016/s0009-2541(02)00195-x)
9. Червяковский В. С., Слободчиков Е. А., Червяковская М. В., Волчек Е. Н. Особенности геологического строения и первые результаты изотопного датирования вулканических пород в бассейне р. Исеть, Восточно-Уральская мегазона // Известия УГГУ. 2021. Вып. 1 (61). С. 55–64. <https://10.21440/2307-2091-2021-1-55-64>
10. Sun S.-S., McDonough W. F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes // Geological Society, London, Special Publications. Magmatism in the Oceanic Basins. 1989. Vol. 42. P. 313–345. <http://dx.doi.org/10.1144/gsl.sp.1989.042.01.19>
11. Hoskin P. W. O. Trace-element composition of hydrothermal zircon and the alteration of Hadean zircon from the Jack Hills, Australia // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2005. Vol. 69. issue 3. P. 637–648. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2004.07.006>
12. Балашов Ю. А., Скублов С. Г. Контрастность геохимии магматических и вторичных цирконов // Геохимия. 2011. № 6. С. 622–633. <https://doi.org/10.1134/S0016702911040033>
13. Bouvier A.-S., Ushikubo T., Kita N. T., Cavosie A. J., Kozdon R., Valley J. W. Li isotopes and trace elements as a petrogenetic tracer in zircon: insights from Archean TTGs and sanukitoids // Contributions to Mineralogy and Petrology. 2012. Vol. 163. P. 745–768. <https://doi.org/10.1007/s00410-011-0697-1>
14. Пучков В. Н. Палеогеодинамика Южного и Среднего Урала. Уфа: Даурия, 2000. 146 с.
15. Смирнов В. Н., Коровко А. В. Палеозойский вулканизм восточной зоны Среднего Урала // Геодинамика, магматизм, метаморфизм и рудообразование: сборник науч. трудов. Екатеринбург: УрО РАН, 2007. С. 395–420.

Статья поступила в редакцию 15 августа 2023 года

Geochemical characteristic of rocks and isotope dating of zircon from the andesite dyke of the rudyanskaya sequence (D_2rd) of the Middle Urals Eastern zone

Vasiliy Stanislavovich CHERVYAKOVSKIY^{1*}
Evgeniy Aleksandrovich SLOBODCHIKOV²
Mariya Vladimirovna CHERVYAKOVSKAYA¹
Nadezhda Nikolaevna FARRAKHOVA¹
Elena Nikolaevna VOLCHEK^{1**}

¹The Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russia

²Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia

Abstract

Relevance. In the basin of the r. Pishma subvolcanic formations, localized in the fields of spreading of the Middle Devonian Rudyanskaya sequence, are presented by different on composition small bodies, sills and dykes, forming with volcanogenic rocks of the Rudyanskaya sequence a basalt-andesite-rhyolite complex, the formation of which is associated with volcanic activity, that took place in Middle Devonian in the environments close to the modern island arcs. Their isotope dating and geochemical characteristic are rather relevant for specification of the composition, volume and paleogeodynamic environment of the vulcanite formation. In the paper new data are presented on geochemistry of andesites of the dyke from the Diviy Kamen rock, considered as part of the Rudyanskaya sequence, as well as the age of zircon from them.

Methods. Chemical analyses of vulcanites have been performed in the Centre of collective usage “Geoanalyst” of the Institute of Geology and Geochemistry of the UB of RAS (Ekaterinburg) by X-ray fluorescent method and ICP–MS method. Zircons were studied with scanning electron microscope JSM-6390L of the Jeol firm and with electrone-probe microanalyser Cameca SX100. The data on the U and Pb isotopes, as well as on elements-impurities in zircon grains were obtained by mass-spectrometry method with inductively coupled plasma with laser ablation (LA–ICP–MS) at the quadrupole ISP–MS NexION 300S with the attachment for laser ablation LA NWR 213.

Purpose of researches. Getting new data on geochemical composition and age of the andesites of dyke in the section along the r. Pishma.

Results. The andesite dyke intersects medium clastic unstratified tuffs and dipply occurring fragment of the lava flow of porphyry dacite. Andesites present themselves porphyry rocks with 20–30% of plagioclase phenocrysts. At the normalized many-component diagram the Ta–Nb minimum is displayed. For zircon grains are characteristic differentiated spectra, demonstrating the growth of compositions from light to heavy REE, positive Ce and negative Eu anomalies, typical of the zircon of magmatic genesis. For the first time geochronological study of zircons from andesites has been made by method of LA–ICP–MS. 4 age groups of zircons, Ma: 390–387, 369–362, 337–345, 327–329 were revealed.

Conclusions. The data obtained testify that andesites were formed under suprasubduction environments, and magmatic stage of rock formation corresponds to the upper Devonian varieties of zircons. Early Carboniferous datings can be associated with the thermal impact caused by the intrusion of a later dolerite dyke.

Keywords: Eastern zone of the Urals, Rudyanskaya sequence, andesite, dyke, geochemical characteristic, zircon, isotope age.

The research was carried out within the framework of topic No. AAAA-A19-119072990020-6 of the state assignment of the IGG, UB RAS. Retrofitting and comprehensive development of the CUC “Geoanalyst” of the IGG, UB RAS is carried out with the financial support of a grant from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Agreement No. 075-15-2021-680.

REFERENCES

1. Koroteev V. A., Dianova T. V., Kabanova L. Ya. 1979, Middle Paleozoic volcanism of the Eastern zone of the Urals. Leningrad, 129 p. (*In Russ.*)
2. Korovko A. V., Kuzovkov G. N., Burnatnaya L. N., Manankova G. P., Purtov V. A., Brusnitsin V. D., Vedernikov V. V. 2002, Information report on forecasting and prospecting work for gold on Alapaevskaya Square: report of the Isetskaya GSP for 2000–2002. Yekaterinburg, book 1, 282 p. (*In Russ.*)

*v.chervyakovskiy@mail.ru

**volchek@igg.uran.ru

3. Kazakov I. I., Storozhenko E. V., Kharitonov I. N., Stefanovsky V. V. 2016, Report on the results of work on the GDP-200 object, sheet O-41-XX (Alapaevskaya area) for 2014–2016. Ekaterinburg, book 1, 306 p. (*In Russ.*)
4. Plyusnin K. P., Plyusnina A. A. 1994, Report on the topic “experimental and methodological work on the creation of an industrial training ground for large-scale geological mapping (Sukholozhsky site).” Ekaterinburg. (*In Russ.*)
5. Volchek E. N., Necheukhin V. M. 2012, Petrogeochemical features of volcanic rocks of the Suholozhskaya site (Eastern segment of the Middle Urals) and their significance for geodynamic reconstructions. *Litosfera* [Lithosphere], no. 3, pp. 146–150. (*In Russ.*)
6. Koroteev V. A., Chervyakovsky V. S., Zaitseva M. V., Volchek E. N., Necheukhin V. M. 2019, First determination of the isotopic age of the andesite-dacite complex of the Eastern zone of the Middle Urals. *Doklady Akademii Nauk* [Reports of the Academy of Sciences], vol. 487 (2), pp. 174–178. (*In Russ.*)
7. Zaitseva M. V., Pupyshev A. A., Shchapova Yu. V., Votyakov S. L. 2016, U–Pb dating of zircons using a quadrupole mass spectrometer with inductively coupled plasma NexION 300S and an attachment for laser ablation NWR 213. *Analitika i kontrol'* [Analytics and control], vol. 20, no. 4, pp. 294–306. (*In Russ.*) <https://doi.org/10.15826/analitika.2016.20.4.006>
8. Andersen T. 2002, Correction of common lead in U–Pb analyses that do not report ²⁰⁴Pb. *Chemical Geology*, vol. 192, issue 1–2, pp. 59–79. [https://doi.org/10.1016/s0009-2541\(02\)00195-x](https://doi.org/10.1016/s0009-2541(02)00195-x)
9. Chervyakovsky V. S., Slobodchikov E. A., Chervyakovskaya M. V., Volchek E. N. 2021, Features of the geological structure and the first results of isotope dating of volcanic rocks in the Iset river basin, East Ural megazone. *Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta* [News of the Ural State Mining University], issue 1 (61), pp. 55–64. (*In Russ.*) <https://10.21440/2307-2091-2021-1-55-64>
10. Sun S. S., McDonough W. F. 1989, Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. *Geological Society*. London, vol. 42, pp. 313–345. <http://dx.doi.org/10.1144/gsl.sp.1989.042.01.19>
11. Hoskin P. W. O. 2005, Trace-element composition of hydrothermal zircon and the alteration of Hadean zircon from the Jack Hills, Australia. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 69, issue 3, pp. 637–648. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2004.07.006>
12. Balashov Yu. A., Skublov S. G. 2011, Contrast of geochemistry of magmatic and secondary zircons. *Geokhimiya* [Geochemistry], no. 6, pp. 622–633. (*In Russ.*) <https://doi.org/10.1134/S0016702911040033>
13. Bouvier A.-S., Ushikubo T., Kita N. T., Cavosie A. J., Kozdon R., Valley J. W. 2012, Li isotopes and trace elements as a petrogenetic tracer in zircon: insights from Archean TTGs and sanukitoids. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, vol. 163, pp. 745–768. <https://doi.org/10.1007/s00410-011-0697-1>
14. Puchkov V. N. 2000, Paleogeodynamics of the Southern and Middle Urals, 146 p. (*In Russ.*)
15. Smirnov V. N., Korovko A. V. 2007, Paleozoic volcanism of the eastern zone of the Middle Urals. Geodynamics, magmatism, metamorphism and ore formation: collection of science. Ekaterinburg, pp. 395–420. (*In Russ.*)

The article was received on August 15, 2023

Особенности электропроводности при высоких температурах труднообогатимых титаномагнетитовых руд из Гусевогорского месторождения

Владимир Васильевич БАХТЕРЕВ*

Институт геофизики им. Ю. П. Булашевича УрО РАН, Екатеринбург, Россия

Аннотация

Актуальность определяется поиском и отбором наиболее информативных характеристик и физических свойств труднообогатимых титаномагнетитовых руд в связи с необходимостью научно обоснованных критериев их обнаружения, оценки качества при селективной добыче и выборе оптимальной технологии обогащения.

Методика исследования. Для исследования электрических свойств были использованы образцы в форме кубика с ребром 0,02 м. Измерения выполнены в открытой системе при атмосферном давлении. Электрическое сопротивление измеряли двухэлектродной установкой через каждые 10 градусов в интервале температур 20–800 °С. Скорость нагревания 0,066 град/с. Измерительный прибор – тераомметр Е6-13 с динамическим диапазоном от 10 до 10¹⁴ Ом и относительной ошибкой измерений от ±2,5 % до 4 % в конце диапазона.

Результаты. Физическими, минералого-петрографическими методами изучена коллекция образцов труднообогатимых титаномагнетитовых руд из Гусевогорского месторождения (Северный карьер). Установлены функциональные связи между электрическими параметрами высокотемпературной электропроводности (E_0 – энергия активации, $\lg R_0$ – так называемый коэффициент электрического сопротивления), величиной и характером электрического сопротивления $\lg R$ в интервале температур 20–800 °С исследованных образцов труднообогатимых руд с их структурно-текстурными особенностями и минеральным составом. По структурно-текстурным особенностям, минеральному составу и электрическим параметрам исследованные образцы четко разделяются на три группы.

Выводы. Приведенные результаты в комплексе с другими физико-химическими параметрами могут быть использованы в качестве надежного индикатора экспрессной оценки изучаемого материала. Существенные различия электрических параметров титаномагнетитовых руд дают дополнительную информацию об их качестве. В комплексе с другими методами позволяют надеяться на возможность использовать эти параметры при селективной выемке руд, требующих различных режимов обогащения.

Ключевые слова: труднообогатимые титаномагнетитовые руды, структура и текстура, высокая температура, электрические параметры.

Введение

Гусевогорское месторождение относится к типу малотитанистых титаномагнетитовых руд, приуроченных к дунит-пироксенит-габбровой формации Платиноносного пояса Урала. Оруденение связано с различными типами пород: оливинитами, верлитами, пироксенитами.

«Минеральный состав руд довольно разнообразен. Рудные минералы включают магнетит четырех генераций, ильменит двух генераций, титаномагнетит, ульвошпинель и шпинель состава герцинит-плеонаст; нерудные – моноклинный (диаллаг) и ромбический пироксены, плагиоклазы. Вторичные минералы в руде представлены серпентином, амфиболом, цизитом, эпидотом и хлоритом. Вмещающими породами являются диаллаговые, оливиновые и плагиоклазовые пироксениты, амфиболиты, верлиты и габбро» [1].

Для титаномагнетитовых руд месторождения характерны разные морфогенетические типы текстур – массивные, вкрапленные, пятнистые, пятнисто-вкрапленные,

вкрапленно-полосчатые, полосчатые с преобладанием вкрапленных. Вкрапленные руды обычно представляют собой агрегат зерен титаномагнетита самых разных размеров – от тысячных долей до первых десятков миллиметров. В соответствии с разработанной геологической службой комбината классификацией текстур руд, учитывающей количественное соотношение пяти фракций титаномагнетита, выделяются следующие типы: крупновкрапленные (крупность зерен >3 мм), средневкрапленные (1–3 мм), мелковкрапленные (0,2–1 мм), тонковкрапленные (0,074–0,2 мм) и дисперсно-вкрапленные (< 0,074 мм) [2, 3].

Наличие нескольких морфологических разновидностей вкрапленности титаномагнетита и широкий диапазон колебаний размеров зерен и агрегатов обуславливают текстурную неоднородность руд на месторождении и выступают в качестве одного из ведущих факторов, влияющих на эффективность обогащения. Легкообогатимые

✉ ugv@bk.ru

 <http://orcid.org/0000-0002-1174-1301>

руды – крупно- и средневкрапленные; труднообогатимые руды по текстурным критериям соответствуют дисперсно- и тонковкрапленной разновидности [4–6]. «Для структур вкрапленных магматических титаномагнетитовых руд характерно определенное соотношение между силикатами и рудными минералами. Силикаты выделяются в форме хорошо образованных идиоморфных кристаллических зерен, а рудные минералы выполняют лишь интерстиции между ними, формируя типичные сидеронитовые структуры» [4]. Структуры и текстуры руд соответствуют структурам и текстурам вмещающих пород. В мелкозернистых пироксенитах отмечается мелкокрапленное оруденение, в крупнозернистой породе наблюдаются крупные рудные вкрапления [7]. Сложный химический и фазовый составы, а также особенности онтогении титаномагнетита оказывают существенное влияние на электрические свойства минерала, являются одними из параметров количественной оценки неоднородности.

Исследования состава и структуры ряда минералов показали, что большинство их свойств меняются при уменьшении размеров индивидов, особенно заметно с величины 0,1 мм [8]. На примере песчаника и известняка показано влияние микроструктуры горных пород на макроскопические теплофизические свойства, в частности эффективную теплопроводность [9]. Это может позволить провести классификацию горных пород по литологической микроструктуре с различными типами насыщения и определить взаимосвязь между микроструктурой горной породы и ее теплофизическими свойствами.

Подобные «размерные модификации» рассматриваются как разновидность минерального вида – микроминералы. Они известны в физике как «малые частицы», что определяет их аномальные свойства [10]. Выявлены уникальные физические свойства наноматериалов, в первую очередь магнитные и электрофизические: электропроводность, диэлектрическая проницаемость. На этом основано создание новых материалов с заданными свойствами. Так, в зависимости от способа выращивания кристаллов получают разную структуру. В результате меняется частотный спектр диэлектрических потерь в интервале частот 10^{-3} – 10^3 Гц [11].

Установлено, что «для всех типов пород (базальты, пироксениты, перидотиты), характеризующихся мелкодисперсным (пылевидным) выделением рудного минерала, отмечается весьма существенное завышение электропроводности по сравнению с породами, в которых эти выделения находятся в виде зерен крупных размеров» [12].

Оценка технологических типов титаномагнетитовых руд важна на стадии разработки с целью селективной выемки. При этом электрические свойства, в том числе и при высоких температурах, горных пород как весьма чувствительные индикаторы вещественного их состава, структурных и текстурных особенностей являются важным источником информации. Цель настоящей работы – исследовать температурную зависимость электрического сопротивления труднообогатимых титаномагнетитовых руд в интервале температур 20–800 °С; выявить и установить функциональные связи между электрическими параметрами высокотемпературной электропроводности (E_0 – энергия активации, $\lg R_0$ – так называемый коэффи-

циент электрического сопротивления), величиной и характером электрического сопротивления $\lg R$ исследованных образцов труднообогатимых руд с их структурно-текстурными особенностями и минеральным составом.

Методика исследований

Методика определения электропроводности образцов горных пород и электрических параметров при высоких температурах описана ранее [13]. Образцы для исследований вырезали в форме кубика с ребром 0,02 м. Измерения выполнены в открытой системе при атмосферном давлении. Электрическое сопротивление измеряли двухэлектродной установкой через каждые 10 градусов в интервале температур 20–800 °С. Скорость нагревания 0,066 град/с. Температуру в системе определяли платино-платинородиевой термопарой в 0,01 м от образца. Прибор для измерения электрического сопротивления – тераомметр Е6-13 с динамическим диапазоном от 10 до 10^{14} Ом и пределами допустимой относительной погрешности измерений от $\pm 2,5$ до 4 % в конце диапазона.

Для определения энергии активации E_0 и коэффициента электрического сопротивления $\lg R_0$ кривые высокотемпературной электропроводности были построены в координатах $\lg R, 1/T$ (рис. 1). Энергия активации E_0 определена по величине тангенса угла наклона касательной к кривой $\lg R = f(1/T)$ в некоторой точке прямолинейного участка в температурной области, где кривая $\lg R = f(1/T)$ не искажена аномальными эффектами. Этому условию удовлетворяет окрестность температуры магнитного превращения. Кроме того, исследование электрических свойств в области точки Кюри представляет самостоятельный интерес. Электрические параметры могут быть использованы при оценке особенностей магнитных превращений в этого рода материалах [14]. Коэффициент электрического сопротивления $\lg R_0$ определен как величина отрезка, отсекаемого касательной к кривой $\lg R = f(1/T)$ на оси ординат.

Образцы для исследований отобраны из Северного карьера труднообогатимых титаномагнетитовых руд, представленных верлитами, оливиновыми и диаллаговыми пироксенитами с различной текстурой и структурой, формой выделения от средневкрапленной до дисперсной.

Результаты и их обсуждение

На рис. 2–4 приведены температурные зависимости электрического сопротивления исследованных образцов. Чтобы не загромождать рисунки, приведены зависимости лишь для части исследованных образцов. Другие кривые, не помещенные на рисунки, вписываются в приведенные интервалы значений электрического сопротивления. Генетические, минералогические, структурно-текстурные особенности образцов отразились на характере их электропроводности при высоких температурах. Выделено три группы образцов, различающихся величиной электрического сопротивления при нормальной температуре и характером температурной зависимости в интервале 20–800 °С.

Первая группа образцов (рис. 2)

Образец 4858. Оливиновый пироксенит с вкрапленностью титаномагнетита, среднезернистый. Магнетит в виде отдельных зерен между зернами пироксена и в виде вкрапленности в прожилках серпентина в оливине. Магнетита 1–1,5 %. Зерно 0,3–0,4 мм.

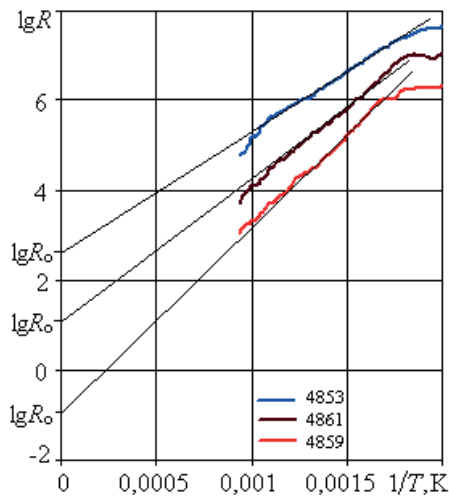


Рисунок 1. Определение электрических параметров исследованных образцов. Числа рядом с кривыми – номера образцов, описанных в тексте

Figure 1. Determination of electrical parameters of the studied samples. Numbers next to curves – numbers of samples described in the text

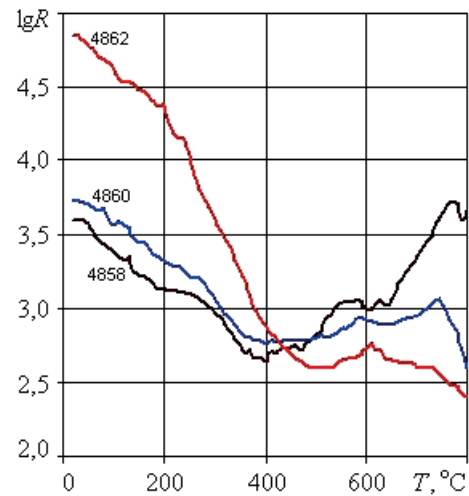


Рисунок 2. Температурные зависимости электрического сопротивления первой группы образцов титаномагнетитовой руды. Числа рядом с кривыми – то же, что на рис. 1

Figure 2. Temperature dependences of the electrical resistance of the first group of titanomagnetite ore samples. The numbers next to the curves are the same as in fig. 1

Образец 4860. Пироксенит диаллаговый, оливин- и амфиболсодержащий. Убоговкрапленная ильменит-титаномагнетитовая руда, среднезернистая, сидеронитовая. Магнетит заполняет пространство между зернами клинопироксена; образует тонкие вкрапления в прожилках серпентина внутри зерен оливина. Магнетита 10–15 %. Размер зерен магнетита 0,2–0,3 мм.

Образец 4862. Пироксенит диаллаговый, оливин и амфиболсодержащий, мелко-, тонкозернистый, мелко-, тонковкрапленный. Убого-редковкрапленная ильменит-титаномагнетитовая руда, среднезернистая, сидеронитовая. Магнетит заполняет пространство между зернами клинопироксена и образует тонкие вкрапления в прожилках серпентинита и зернах оливина. Магнетита 25–30 %. Размер зерен магнетита 0,5–0,1 мм, иногда до 2 мм.

Особенность электропроводности образцов этой группы: при нормальной температуре сопротивление этих образцов самое низкое (в пределах 4,5–56 кОм), с повышением температуры нагревания почти монотонно уменьшается, достигая наименьших значений в районе 420–450 °С. Здесь все исследованные образцы этой группы имеют почти одинаковое сопротивление (570–600 Ом). Далее кривые «расходятся веером» и изменяются сложным образом с повышением температуры до 800 °С. При температуре 800 °С имеют самый большой из всех исследованных образцов разброс (0,26–4,50 кОм.).

С уменьшением размера зерна магнетита от 0,4 мм до 0,1 мм в исследованных образцах E_0 увеличивается от 0,16 до 0,45 эВ; $\lg R_0$ уменьшается от +2,92 до –1,5.

Вторая группа образцов (рис. 3)

Образец 4853. Верлит безрудный с прослоями плагиоклазита и рудного диаллага.

Образец 4859. Пироксенит оливиновый тонко-мелкозернистый, тонко-мелковкрапленный. Убоговкрапленная ильменит-титаномагнетитовая руда, среднезернистая,

сидеронитовая. Магнетит в виде поликристаллического агрегата заполняет пространство между зернами клинопироксена. Магнетита 10–15 %.

Образец 4861. Пироксенит с вкрапленностью титаномагнетита, руда среднезернистая, сидеронитовая. Магнетит заполняет пространство между зернами клинопироксена и образует вкрапления в прожилках серпентина внутри зерен оливина. Магнетита 5–7 %.

Все температурные кривые электрического сопротивления находятся в диапазоне примерно 100 Ом, монотонно уменьшаются со значений (10^8 – 10^{10}) Ом, равных при нормальной температуре до (10^3 – 10^5) Ом при 800 °С.

Третья группа образцов (рис. 4)

Образец 4854. Пироксенит оливиновый тонко-мелкозернистый с шлировым оруденением. Убоговкрапленная ильменит-титаномагнетитовая руда, среднезернистая, сидеронитовая. Текстура шлирово-вкрапленная. Магнетит заполняет пространство между зернами оливина, а также образует обособления размером до 3 мм по короткой оси из зерен размером 1–2 мм. Наблюдаются также тонкие вкрапления в прожилках серпентина в оливине. Магнетита 15–20 %. Размер зерна 1–2 мм.

Образец 4855. Верлит безрудный, дисперсный с процессами окисления и оливинизации.

Образец 4857. Пироксенит оливиновый тонко-мелкозернистый с шлировым оруденением. Убоговкрапленная ильменит-титаномагнетитовая руда, среднезернистая, сидеронитовая. Магнетит заполняет пространство между зернами клинопироксена и образует тонкие вкрапленники в прожилках серпентина в оливине. Количество магнетита 30–35%. Размер зерна магнетита 1,5–2,0 мм.

Тонкодисперсные руды наиболее труднообогатимые. Размер зерна магнетита во всех исследованных образцах группы примерно 1–2 мм.

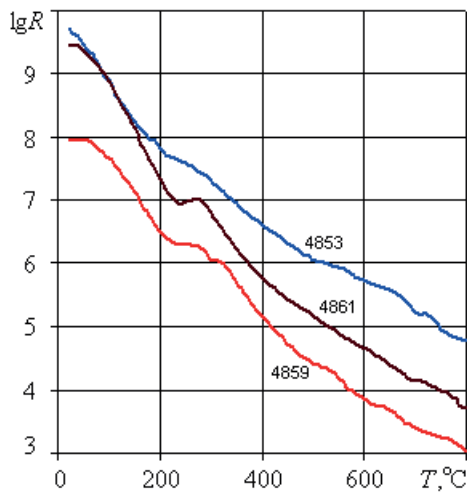


Рисунок 3. Температурные зависимости электрического сопротивления второй группы образцов титаномагнетитовой руды
Figure 3. Temperature dependences of electrical resistance of the second group of titanomagnetite ore samples

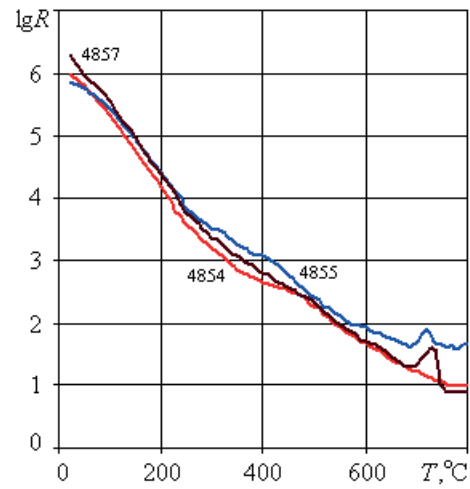


Рисунок 4. Температурные зависимости электрического сопротивления третьей группы образцов титаномагнетитовой руды
Figure 4. Temperature dependences of the electrical resistance of the third group of titanomagnetite ore samples

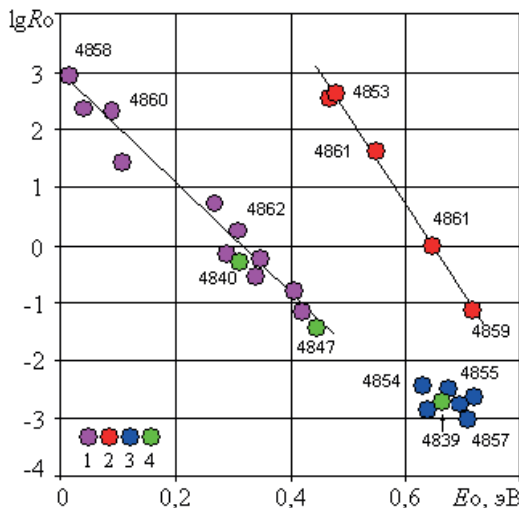


Рисунок 5. Связь между E_0 и $\lg R_0$ исследованных образцов труднообогатимых руд: 1, 2, 3 – группы образцов; 4 – образцы, исследованные ранее [15]. Числа около некоторых точек – номера образцов, описанных в тексте. Линии – прямые корреляции групп образцов: 1, 2 – соответственно $\lg R_0 = 2,91-9,33 E_0$, $R^2 = 0,96$; $\lg R_0 = 9,81-15,14 E_0$, $R^2 = 0,99$
Figure 5. Relationship between E_0 and $\lg R_0$ of the studied samples of complex ores: 1, 2, 3 – groups of samples; 4 – samples studied earlier [15]. The numbers near some points are the numbers of the samples described in the text. Lines – direct correlations of groups of samples: 1, 2 – respectively, $\lg R_0 = 2,91-9,33 E_0$, $R^2 = 0,96$; $\lg R_0 = 9,81-15,14 E_0$, $R^2 = 0,99$

При нормальной температуре имеют сопротивление промежуточное между сопротивлением образцов других групп, между собой различаются до нескольких единиц Ом во всем температурном интервале, монотонно уменьшаясь от $(9-21) \cdot 10^5$ Ом при нормальной температуре, до $(8-60)$ Ом при 800°C . Электрические параметры всех образцов примерно одинаковы ($\lg R_0$ изменяется от $-2,42$ до $-3,00$; E_0 изменяется от $0,63$ до $0,71$ эВ).

Во всем температурном интервале характер зависимости для отдельных образцов изменяется различным и сложным образом. Однако для всех образцов на кривых $\lg R = f(T)$ выделяется линейный участок в области температуры Кюри $450-650^\circ\text{C}$. Его положение и протяженность на температурной кривой для отдельных образцов имеет разное значение. Для этой области $450-650^\circ\text{C}$ были определены параметры высокотемпературной электропроводности E_0 и $\lg R_0$ всех исследованных образцов.

Результаты приведены на рис. 5, где показана связь между E_0 и $\lg R_0$ исследованных образцов. Графическое изображение этой связи в координатах E_0 , $\lg R_0$ обнаруживает обширное поле распределения фигуративных точек, которое вмещает в себя результаты исследования всех образцов. По этим параметрам также выделяются три группы образцов, отличающиеся параметрами и их вариацией. Четко прослеживается связь между параметрами для групп образцов 1 и 2 в виде $\lg R_0 = a - b \cdot E_0$, где a , b – коэффициенты. Для каждой группы образцов коэффициенты имеют свои значения. Связано это с различными генетическими, минералогическими, структурно-текстурными особенностями образцов.

По данным П. В. Лузянина (главный геофизик ООО «ЕВРАЗ КГОК»), руда, из которой отобраны образцы № 4839, 4840, 4847, тонкодисперсная и трудно поддается обогащению. Эти образцы были изучены нами ранее [15].

Заключение

Исследована высокотемпературная электропроводность образцов труднообогатимых титаномагнетитовых руд из Северного карьера Гусевогорского месторождения.

Получены температурные зависимости электрического сопротивления в интервале $20-800^\circ\text{C}$ образцов труднообогатимых титаномагнетитовых руд. Установлены параметры высокотемпературной электропроводности (энергия активации E_0 и коэффициент электрического сопротивления $\lg R_0$). Выявлены функциональные связи между электрическими параметрами высокотемпе-

ратурной электропроводности исследованных образцов труднообогатимых руд с их структурно-текстурными особенностями и минеральным составом. По структурно-текстурным особенностям, минеральному составу и электрическим параметрам исследованные образцы четко разделяются на три группы.

Существенные различия электрических параметров титаномагнетитовых руд дают дополнительную информацию

об их качестве. В комплексе с другими методами результаты исследований быть использованы при селективной выемке руд, требующих различных режимов обогащения.

Исследованные образцы по параметрам E_0 , $\lg R_0$ разделились на три группы. Также отличаются по величине электрического сопротивления при нормальной температуре и характеру температурной зависимости в интервале температур 20–800 °С.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бузмаков В. Н., Володина Ю. В. Оценка влияния минерального состава рудных тел титаномагнетитов Гусевогорского месторождения на концентрацию ванадия в продуктах их переработки // Известия УГГУ. 2020. Вып. 3(59). С. 62–68. <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2020-3-62-68>
2. Пироксениты Качканара / В. Г. Фоминых [и др.]. Свердловск: ИГГ УФАИ СССР, 1967. 84 с.
3. Железорудная база России. Изд. 2-е, перераб. и доп. / под ред. В. П. Орлова. М.: Геоинформмарк. 2007. 871 с.
4. Пирогов Б. И., Броницкая Е. С., Астахова Ю. М., Волков Е. С. Особенности вещественного состава титаномагнетитовых руд магматического генезиса, определяющие их обогатимость // Разведка и охрана недр. 2013. № 2. С. 47–51. <https://www.elibrary.ru/ofunqw>
5. Пирогов Б. И., Быстров И. Г. Типоморфные особенности титаномагнетита в связи с обогатимостью железных руд магматического генезиса // Разведка и охрана недр. 2015. № 7. С. 49–54.
6. Яковлев В. Л., Лаптев Ю. В., Яковлев А. М. Геоинформационная оценка изменчивости титаномагнетитовых руд Гусевогорского месторождения // Литосфера. 2014. № 5. С. 122–128.
7. Иванов О. К., Зворская С. А. Новые данные о структуре Качканарско-Гусевогорского габбро-пироксенитового плутона (Урал) // Докл. АН СССР. 1990. Т. 313. № 4. С. 931–935.
8. Конеев Р. И., Кушмурадов О. К., Туресебеков А. Х. Микроминералогия – предмет, методы, применение. Ташкент: Изд. ТГУ, 1994. 89 с.
9. Горбань И. А., Динариев О. Ю., Сафонов С. С. Исследование влияния микроструктуры горных пород на макроскопические теплофизические свойства // Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук: труды 52-й науч. конф. МФТИ. Ч. III. Аэрофизика и космические исследования. М.: МФТИ, 2009. Т. 2. С. 24–27.
10. Петров Ю. И. Физика малых частиц. М.: Наука, 1982. 359 с.
11. Нгуен Х. Т., Миловидова С. Д., Сидоркин А. С., Рогазинская О. В. Диэлектрические свойства композитов на основе нанокристаллической целлюлозы с триглицидсульфатом // Физика твердого тела. 2015. Т. 57. Вып. 3. С. 491–494.
12. Пархоменко Э. И., Бондаренко А. Т. Электропроводность горных пород при высоких давлениях и температурах. М.: Недра, 1972. 278 с.
13. Бахтерев В. В. Электропроводность при высоких температурах образцов магнетитовых руд – возможный индикатор их минерального состава и генетических особенностей месторождения // Известия вузов. Геология и разведка. 2012. № 5. С. 40–45.
14. Белов К. П. Ферромагнетики и антиферромагнетики вблизи точки Кюри // Успехи физических наук. 1958. Т. LXV. Вып. 2. С. 207–256. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0065.195806i.0207>
15. Бахтерев В. В. Особенности электропроводности при высоких температурах титаномагнетитов из Гусевогорского месторождения // Уральский геофизический вестник. 2017. № 2(30). С. 16–21. <https://doi.org/10.25698/UGV.2017.2.11701>

Статья поступила в редакцию 02 июля 2023 года

Features of electrical conductivity at high temperatures of complex titanomagnetite ores from the Gusevogorsky deposit

Vladimir Vasil'evich BAKHTEREV*

Bulashevich Institute of Geophysics of the Ural Branch of RAS, Yekaterinburg, Russia

Abstract

Relevance is determined by the search and selection of the most information-intensive characteristics and physical properties of complex titanomagnetite ores in connection with the need for scientifically based criteria for their detection, quality assessment during selective mining and selection of optimal enrichment technology.

Research methodology. To study the electrical properties, samples in the shape of a cube with an edge of 0.02 m were used. The measurements were carried out in an open system at atmospheric pressure. Electrical resistance was measured with a two-electrode setup every 10 degrees in the temperature range 20–800 °C. Heating rate 0.066 deg/s. The measuring device is an E6-13 teraohmmeter with a dynamic range from 10 to 10¹⁴ Ohms and a relative measurement error from ±2.5% to 4% at the end of the range.

Results. A collection of samples of complex titanomagnetite ores from the Gusevogorsky deposit (Northern quarry) was studied using physical, mineralogical and petrographic methods. Functional connections have been established between the electrical parameters of high-temperature electrical conductivity (E_0 – activation energy, $\lg R_0$ – the so-called electrical resistance coefficient), the value and nature of the electrical resistance $\lg R$ in the temperature range 20–800 °C of the studied samples of complex ores with their structural and textural features and mineral composition. Based on structural and textural features, mineral composition and electrical parameters, the studied samples are clearly divided into three groups.

Conclusions. The presented results, in combination with other physicochemical parameters, can be used as a reliable indicator of rapid assessment of the material being studied. Significant differences in the electrical parameters of titanomagnetite ores provide additional information about their quality. In combination with other methods, we hope for the possibility of using these parameters in the selective extraction of ores that require different enrichment regimes.

Keywords: complex titanomagnetite ores, structure and texture, high temperature, electrical parameters.

REFERENCES

1. Buzmakov V. N., Volodina Yu. V. 2020, Assessment of the influence of the mineral composition of ore bodies of titanomagnetites of the Gusevogorsky deposit for the concentration of vanadium in the products of their processing. *Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta* [News of the Ural State Mining University], issue 3 (59), pp. 62–68. (In Russ.) <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2020-3-62-68>
2. Fominykh V.G. [et al.]. 1967, Pyroxenites of Kachkanar, Sverdlovsk, 84 p. (In Russ.)
3. Orlova V. P. 2007, Iron ore base of Russia. 2nd. Edition. Moscow, 871 p. (In Russ.)
4. Pirogov B. I., Bronitskaya E. S., Astakhova Yu. M., Volkov E. S. 2013, Features of the material composition of titanomagnetite ores of magmatic origin, determining their enrichment. *Razvedka i okhrana nedr* [Exploration and protection of subsoil], no. 2, pp. 47–51. (In Russ.) <https://www.elibrary.ru/ofunqw>
5. Pirogov B. I., Bystrov I. G. 2015, Typomorphic features of titanomagnetite in connection with the enrichment of iron ores of magmatic origin. *Razvedka i okhrana nedr* [Exploration and protection of subsoil], no. 7, pp. 49–54. (In Russ.)
6. Yakovlev V. L., Laptev Yu. V., Yakovlev A. M. 2014, Geoinformation assessment of the variability of titanomagnetite ores of the Gusevogorsky deposit. *Litosfera* [Lithosphere], no. 5, pp. 122–128. (In Russ.)
7. Ivanov O. K., Zvorskaya S. A. 1990, New data on the structure of the Kachkanar-Gusevogorsky gabbro-pyroxenite pluton (The Urals). *Doklady Akademii Nauk SSSR* [Reports of the USSR Academy of Sciences], vol. 313, no. 4, pp. 931–935. (In Russ.)
8. Koneev R. I., Kushmuradov O. K., Turesebekov A. Kh. 1994, Micromineralogy – subject, methods, application. Tashkent, 89 p. (In Russ.)
9. Gorban I. A., Dinariev O. Yu., Safonov S. S. 1982, Study of the influence of rock microstructure on macroscopic thermal and physical properties. *Sovremennyye problemy fundamental'nykh i prikladnykh nauk* [Modern problems of fundamental and applied sciences]. Moscow, 359 p. (In Russ.)
10. Petrov Yu. I. 1982, Physics of small particles. Moscow, 359 p. (In Russ.)
11. Nguyen Kh. T., Milovidova S. D., Sidorkin A. S., Rogazinskaya O. V. 2015, Dielectric properties of composites based on nanocrystalline cellulose with triglycine sulfate. *Fizika tverdogo tela* [Solid state physics], vol. 57, issue 3, pp. 491–494. (In Russ.)
12. Parkhomenko E. I., Bondarenko A. T. 1972, Electrical conductivity of rocks at high pressures and temperatures. Moscow, 278 p. (In Russ.)
13. Bakhterev V. V. 2012, Electrical conductivity at high temperatures of magnetite ore samples is a possible indicator of their mineral composition and genetic characteristics of the deposit. *Izvestiya vuzov. Geologiya i razvedka* [News of universities. Geology and exploration], no. 5, pp. 40–45. (In Russ.)
14. Belov K. P. 1958, Ferromagnets and antiferromagnets near the Curie point. *Uspekhi fizicheskikh nauk* [Advances in Physical Sciences], vol. LXV, issue 2, pp. 207–256. (In Russ.) <https://doi.org/10.3367/JFNR.0065.195806i.0207>
15. Bakhterev V. V. 2017, Features of electrical conductivity at high temperatures of titanomagnetites from the Gusevogorsky deposit. *Ural'skiy geofizicheskii vestnik* [Ural Geophysical Bulletin], no. 2 (30), pp.16–21. (In Russ.) <https://doi.org/10.25698/UGV.2017.2.11701>

The article was received on July 02, 2023

✉ ugv@bk.ru

 <http://orcid.org/0000-0002-1174-1301>

Разработка метода выявления трещин в горных породах криолитозоны на основе дифференцирования данных георадиолокации

Кирилл Олегович СОКОЛОВ*

Институт горного дела Севера им. Н. В. Черского СО РАН, Якутск, Республика Саха (Якутия), Россия

Аннотация

Актуальность работы. Наличие трещин существенно влияет на физико-механические свойства горных пород, что необходимо учитывать при планировании добычных работ и строительстве горнотехнических сооружений. В условиях распространения многолетнемерзлых горных пород, характерных для Северо-Востока России, изучение трещиноватости возможно методом георадиолокации, применяющимся для оценки строения массивов горных пород россыпных месторождений. Критерии выявления трещин по особенностям волновых георадиолокационных полей в настоящее время известны, и основной проблемой, препятствующей полноценному использованию метода георадиолокации для изучения трещин в подповерхностных слоях горных пород, является существенная трудоемкость процессов обработки и интерпретации данных георадиолокационных измерений.

Цель работы – разработать метод обработки результатов георадиолокационных измерений для выявления трещин в мерзлых горных породах.

Методы – физическое и компьютерное моделирование георадиолокационных измерений массива горных пород с трещиной, методы дифференциального исчисления для анализа модели структуры георадиолокационного волнового поля.

Результаты работы и область их применения. В результате проведенных исследований на основе ранней разработанной модели структуры георадиолокационного волнового поля обосновано применение операции дифференцирования для выявления трещин в горных породах криолитозоны. Рассмотрены частные случаи прямолинейных наклонных и горизонтальных осей синфазности георадиолокационных сигналов и для них получены соответствующие формулы. Полученные теоретические результаты апробированы на данных компьютерного и физического моделирования, а также на данных полевых измерений. Проведен анализ особенностей сигналов после дифференцирования, отмечены особенности исходных радарограмм, которые могут помешать достоверной интерпретации полученных результатов.

Выводы. В практике обработки данных георадиолокационных измерений результаты проведенных исследований позволят быстрее выявлять зоны повышенной трещиноватости горных пород. В дальнейшем планируется разработка алгоритма и реализующего его программного обеспечения для картирования трещин горных пород по данным георадиолокации.

Ключевые слова: георадиолокация, трещина, горные породы, модель, интерпретация.

Введение

В горном деле массив горных пород рассматривается как неоднородное геологическое образование, характеризующееся наличием большого количества трещин различного масштабного уровня, разделяющих блоки пород. Трещиноватость значительно влияет на физико-механические свойства горных пород [1–3], и эту характеристику необходимо учитывать при разработке месторождений полезных ископаемых, а также при строительстве горнотехнических сооружений.

На Северо-Востоке России большая часть месторождений полезных ископаемых находится в области распространения многолетнемерзлых горных пород, и для изучения трещиноватости возможно применение

такого метода геофизики, как георадиолокация. Существующие критерии выявления трещин по данным георадиолокации [4–12] рассчитаны на опытного оператора-геофизика, что не позволяет полноценно использовать этот геофизический метод для изучения трещин в подповерхностных слоях горных пород из-за высокой трудоемкости процессов обработки и интерпретации данных.

Для разработки методов автоматизированного выявления трещин горных пород криолитозоны по данным георадиолокационных измерений необходимо установить закономерности проявления трещин в георадиолокационных волновых полях. В данной работе при построении

*k.sokolov@ro.ru

алгоритма обработки георадиолокационных данных нужно будет основываться на разработанной ранее модели георадиолокационного разреза массива мерзлых горных пород с трещиной [13]. В данной модели устанавливается связь между параметрами трещины (положение границ слоев горных пород по глубине слева и справа от трещины и ее ширина) и кинематическими характеристиками наблюдаемого георадиолокационного волнового поля.

Теория. В работе [14] модель GPR представляет собой структуру георадиолокационного разреза, получаемого при зондировании двухслойного массива мерзлых горных пород с прямолинейными границами:

$$GPR = \sum_{T=0}^K \sum_{d=0}^N U_s(d+kT-d_{cm})\theta(T-T_{cm}) \times (1 - \Pi(T-T_{cm}, W_{cm})) + n(T) \quad (1)$$

где K – количество трасс; N – количество отсчетов в трассе; U_s – функция расчета амплитудных значений сигналов; θ – функция Хэвисайда; Π – функция прямоугольного импульса; k – параметр наклона оси синфазности сигналов; T_{cm} – номер трассы, с которой начинается трещина; W_{cm} – ширина трещины; d_{cm} – смещение оси синфазности по вертикали.

В работе [15] на основе феноменологического подхода автором предложены способ описания изменения амплитуд сигналов в области расположения трещины и метод их выявления с помощью дифференцирования данных георадиолокации. Для обоснования применения операции дифференцирования в более общем случае необходимо найти производную выражения (1) по T , т. е. $GPR'_T = dGPR/dT$. Исходя из свойств операции дифференцирования, для нахождения GPR'_T достаточно найти производную следующего выражения:

$$U_s(d+kT-d_{cm})\theta(T-T_{cm})(1-\Pi(T-T_{cm}, W_{cm})),$$

в котором предварительно раскроем скобки и воспользуемся тем, что функция прямоугольного импульса может быть представлена разностью двух функций Хэвисайда;

$$\begin{aligned} U_s(d+kT-\theta(T-T_{cm})d_{cm})(1-\theta(T-T_{cm})+\theta(T-(W_{cm}+T_{cm}))) = \\ = U_s(d+kT-\theta(T-T_{cm})d_{cm})(1-\theta(T-T_{cm})) + \\ + U_s(d+kT-\theta(T-T_{cm})d_{cm})\theta(T-(W_{cm}+T_{cm})). \end{aligned}$$

Получившееся выражение упростим, исходя из того, что множитель $1 - \theta(T - T_{cm})$ не равен 0 при $T < T_{cm}$, и на этом промежутке $\theta(T - T_{cm})d_{cm} = 0$, что позволяет привести выражение, которое уже можно продифференцировать, к следующему виду:

$$\begin{aligned} (U_s(d+kT)(1-\theta(T-T_{cm})) + U_s(d+kT-d_{cm})) \\ \theta(T-(W_{cm}+T_{cm}))' = U_s'(d+kT)(1-\theta(T-T_{cm})) - \\ - U_s(d+kT)\delta(T-T_{cm}) + U_s'(d+kT-d_{cm}) \\ \theta(T-(W_{cm}+T_{cm})) + U_s(d+kT-d_{cm})\delta(T-(W_{cm}+T_{cm})) = \\ = U_s(d+kT)\delta(T-T_{cm}) + U_s'(d+kT-d_{cm}) \\ \delta(T-(W_{cm}+T_{cm})) + U_s'(d+kT)(1-\theta(T-T_{cm})) + \end{aligned}$$

$$+ U_s'(d+kT-d_{cm})\theta(T-(W_{cm}+T_{cm})), \quad (2)$$

где $U_s'(d+kT-d_{cm}) = U_s(d+k(T+1)-d_{cm}) - U_s(d+kT-d_{cm})$.

В формуле (2) третье и четвертое слагаемые показывают, что останется после дифференцирования от осей синфазности георадиолокационных сигналов, первое и второе указывают на начало и конец трещины. В горизонтально-слоистых средах (при $k = 0$) третье и четвертое слагаемые обнуляются, так как $U_s' = 0$:

$$-U_s(d)\delta(T-T_{cm}) + U_s(d-d_{cm})\delta(T-(W_{cm}+T_{cm}))$$

В результате при $k = 0$ получим:

$$GPR'_T = \sum_{T=0}^K \sum_{d=0}^N -U_s(d)\delta(T-T_{cm}) + U_s(d-d_{cm}) \times \delta(T-(W_{cm}+T_{cm})). \quad (3)$$

Анализ формулы (3) показывает, что дифференцирование георадиолокационного волнового поля с горизонтальными осями синфазности приводит к обнулению всего поля, и только на трассах с номерами T_{cm} и $W_{cm} + T_{cm}$ присутствуют разнонаправленные сигналы $-U_s(d)$ и $U_s(d-d_{cm})$, которые однозначно указывают на начало и конец трещины.

В общем же виде с учетом влияния наклонных границ получаем выражение:

$$\begin{aligned} GPR'_T = \sum_{T=0}^K \sum_{d=0}^N -U_s(d+kT)\delta(T-T_{cm}) + \\ + U_s(d+kT-d_{cm})\delta(T-(W_{cm}+T_{cm})) + \\ + U_s'(d+kT)(1-\theta(T-T_{cm})) + U_s'(d+kT-d_{cm}) \times \\ \times \theta(T-(W_{cm}+T_{cm})). \quad (4) \end{aligned}$$

По формуле (4) в GPR'_0 присутствуют мешающие определению местоположения трещины, многочисленные значения, которые представляют собой разность соседних сигналов U_s , один из которых сдвинут относительно другого в соответствии с коэффициентом k . Для того чтобы исключить из рассмотрения эти значения, проведем анализ U'_s , чтобы оценить ее возможные амплитуды. В качестве примера функции U_s рассмотрим импульс Гаусса $U_\Gamma = \exp[-(t-t_{max})^2/c^2]$, который используется в системе grMax [13], наиболее популярной для моделирования данных георадиолокации. Обозначим A – амплитуду импульса; c – ширину импульса; n – количество отсчетов, на которое происходит смещение импульса относительно соседней трассы; t_{max} – время регистрации максимума импульса. Тогда изменение амплитуд импульса Гаусса (dU_Γ) будет равно:

$$dU_\Gamma(t) = U_\Gamma(t-n) - U_\Gamma(t) = A \exp[-(t-n-t_{max})^2/2c^2] - A \exp[-(t-t_{max})^2/2c^2].$$

Данное выражение неудобно для использования в практических целях, так как амплитуда импульсов всегда разная, поэтому определим относительное изменение амплитуд:

$$\frac{dU_\Gamma(t)}{U_\Gamma(t)} = \frac{A \exp[-(t-n-t_{max})^2/2c^2]}{A \exp[-(t-t_{max})^2/2c^2]} = \quad (5)$$

$$= \exp \left[- \left(n^2 + 2tn - 2nt_{\max} \right)^2 / 2c^2 \right].$$

По формуле (5) проведены численные расчеты при различных значениях n , в результате которых установлено, что максимальные значения dU_r наблюдаются в точках перегиба функции U_r , расположенных в $t_{\max} \pm c$. При этом максимальные значения $dU_r = n \cdot 1,5 \%$, что позволяет получать на дифференцированной радарограмме сигналы только на концах осей синфазности путем фильтрации амплитудных значений, больших, чем $An \cdot 0,015$.

Апробация полученных теоретических результатов

Компьютерное моделирование проведено для двух моделей двухслойной среды с горизонтальной и наклонной границами с параметрами: U_s – вторая производная импульса Гаусса; $f = 450$ МГц; $dt = 0,12$ нс; $n = 360$. В первой модели установлены следующие характеристики слоев: 1) мощность $h_1 = 1,2$ м; вещественная часть комплексной диэлектрической проницаемости $\epsilon'_1 = 4$; 2) $h_2 = 1,5$ м; $\epsilon'_2 = 6$. Время регистрации сигналов, отраженных от границы между первым и вторым слоем, составило $t = 2h\sqrt{\epsilon'}/0.3 = 2 * 1.2 * \sqrt{4}/0.3 = 16$ нс (рис. 1, а). Наличие трещины на синтетической радарограмме моделируется разрывом осей синфазности георадиолокационных сигналов на промежутке 1,8–2,5 м. Во второй модели мощность первого слоя изменяется от 1,2 м (в начале радарограммы) до 1 м (в конце радарограммы), что соответствует $t = 13,3$ нс (рис. 1, б), остальные параметры

аналогичны первой модели. После дифференцирования синтетических радарограмм на месте концов осей синфазности сигналов наблюдаются два разнонаправленных одиночных сигнала (рис. 1, в, г), что соответствует формуле (3) и двум первым слагаемым формулы (4). На рис. 1, г также прослеживаются низкоамплитудные сигналы, полученные при вычитании из каждого сигнала соседнего, который сдвинут по времени вверх, в соответствии с третьим и четвертым слагаемыми формулы (4).

Физическое моделирование георадиолокации массива мерзлых горных пород с трещиной проведено в соответствии со схемой, представленной на рис. 2, а. Модель состояла из двух блоков льда, отделенных друг от друга уплотненным снегом, из которого также сформирован верхний слой. В измерениях использовался георадар ОКО-3 с АБ-1200 МГц. На радарограмме (рис. 2, б), полученной в результате измерений, наблюдается разрыв осей синфазности георадиолокационных сигналов, немало искаженных дифрагированными волнами. После дифференцирования на радарограмме (рис. 2, в) в месте расположения трещины остались импульсы с противоположными фазами (выделены белым пунктирным прямоугольником). Так, с левой стороны сигнал начинается с положительного значения (черный цвет), а с правой стороны – с отрицательного значения (белый цвет). Горизонтальные оси синфазности георадиолокационных сигналов, в том числе сигнал прямого прохождения, по-

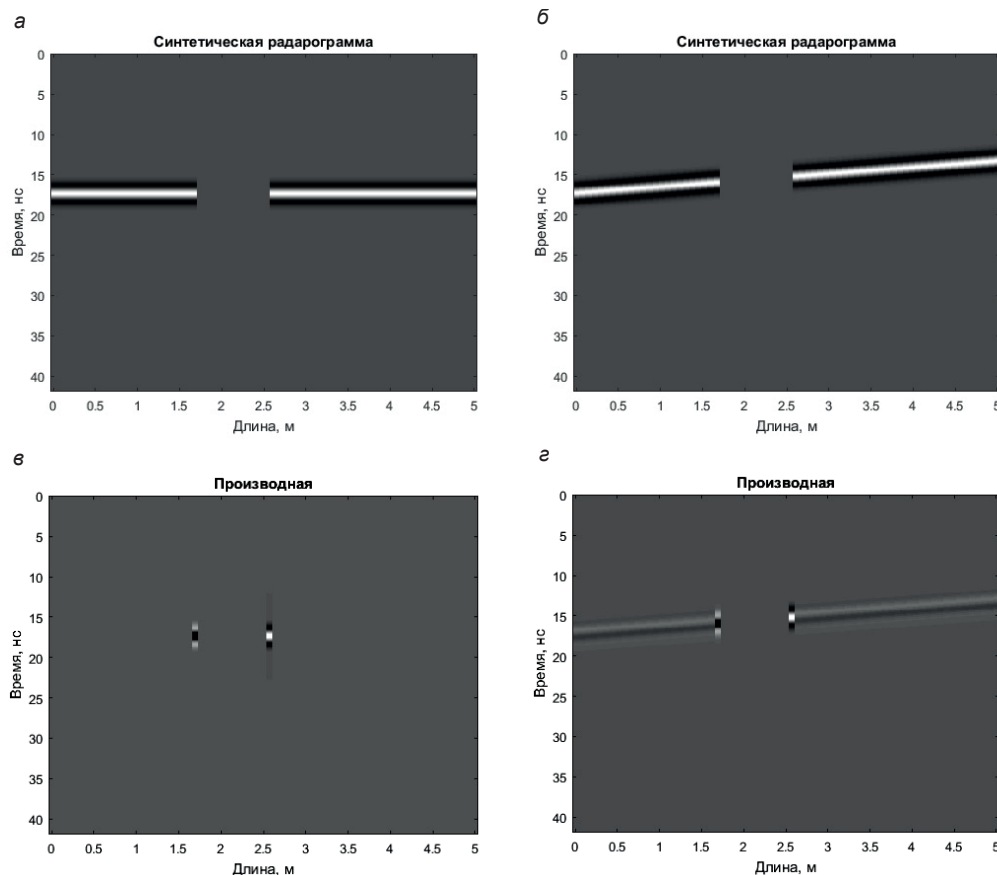


Рисунок 1. Синтетические радарограммы – а, б и результаты их дифференцирования – в, г
 Figure 1. Synthetic radarograms – а, б and the results of their differentiation – в, г

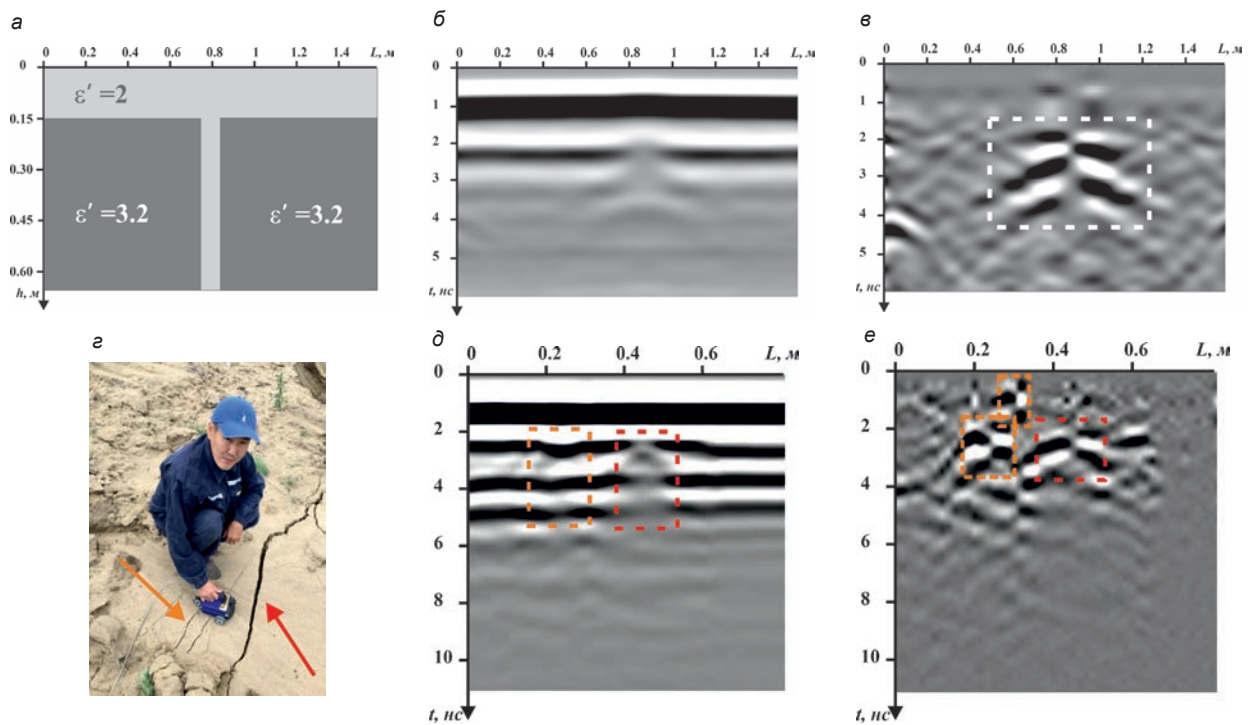


Рисунок 2. Материалы, иллюстрирующие эксперименты по георадиолокационному изучению массива горных пород с трещиной: а – схема массива горных пород для физического моделирования; з – фото эксперимента; б, д – радарограммы; в, е – результаты дифференцирования радарограмм б, д
Figure 2. Materials illustrating experiments on GPR studies of rock masses with a crack: а – diagram of a rock mass for physical modeling; з – photo of the experiment; б, д – radargrams; в, е – results of differentiation of radargrams б, д

сле дифференцирования практически исчезли, остались только малоамплитудные сигналы-помехи.

Натурное моделирование георадиолокационных измерений массива горных пород с трещиной проведено на уступе карьера Кангаласского бурогоугольного месторождения (рис. 2, з). При предварительной обработке полученной радарограммы (рис. 2, д) использовалась только процедура изменения контрастности цвета для облегчения визуального восприятия разрыва осей синфазности. Так, например, широкая трещина (отмечена красным цветом) отобразилась непосредственно разрывом, а более узкие (оранжевый цвет) – только изменением амплитудных значений георадиолокационных сигналов и искажением формы осей синфазности из-за дифрагированных волн. После дифференцирования (рис. 2, е) все трещины выглядят так же, как и в предыдущем эксперименте. Узкие трещины, которые были плохо видны на исходных данных, после обработки отображаются четко и однозначно.

Результаты исследований

В георадиолокации распространение электромагнитных волн происходит в виде сферической волны, вследствие этого на радарограмме присутствуют волны, дифрагированные на концевых участках границ слоев, что приводит к появлению на дифференцированной радарограмме в начале и конце трещины не отдельных сигналов, а коротких наклонных осей синфазности сигналов. Длина этих осей зависит от их глубины, параметров трещины и электрофизических свойств горных пород. После операции дифференцирования «пустое» место в разрыве осей синфазности георадиолокационных сигналов уменьша-

ется на одну трассу, так как происходит вычитание из последней «пустой» трассы первой трассы с правой оси синфазности, что приводит к зрительному уменьшению ширины трещины. Количество импульсов (белых и черных полос) в дифференцированных сигналах может также варьироваться в зависимости от используемого георадара, а также электрической проводимости горных пород.

Схожие результаты после дифференцирования может также давать геофизическая аномалия «яркое пятно», когда на границе раздела геологических сред присутствует локальное резкое увеличение или уменьшение значений электрофизических свойств, например, увеличение влажности приводит к росту вещественной части комплексной относительной диэлектрической проницаемости, что соответственно увеличивает коэффициент отражения и амплитуду отраженного георадиолокационного сигнала. В идеальных условиях данная аномалия после дифференцирования будет ограничена либо только положительными импульсами (черный цвет), либо только отрицательными (белый цвет). Однако при изучении реальных геологических сред «яркое пятно» может отображаться теми же сигналами, что и трещина, но с более низкими амплитудами.

Закрытая трещина со смещением по вертикали после дифференцирования отображается на радарограмме в виде одиночного сигнала, как на рис. 2, е (на отметке 0,6 м по профилю). Необходимо также учитывать наличие на исходной радарограмме множества сигналов-помех, которые искажают георадиолокационные сигналы в большинстве случаев незначительно, но это приводит к появлению низкоамплитудных импульсов и их осей синфазности после дифференцирования.

Выводы

В результате проведенных исследований на основе ранней разработанной модели структуры георадиолокационного волнового поля обосновано применение операции дифференцирования для выявления трещин в горных породах криолитозоны. Рассмотрены частные случаи прямолинейных наклонных и горизонтальных осей синфазности георадиолокационных сигналов и для них получены соответствующие формулы. Полученные теоретические результаты апробированы на данных компьютерного и физического моделирования, а также

на данных полевых измерений. Проведен анализ особенностей сигналов после дифференцирования, отмечены особенности исходных радарограмм, которые могут мешать достоверной интерпретации полученных результатов. В практике обработки данных георадиолокационных измерений результаты проведенных исследований позволят быстрее выявлять зоны повышенной трещиноватости горных пород. В дальнейшем планируется разработка алгоритма и реализующего его программного обеспечения для картирования трещин горных пород по данным георадиолокации.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 0297-2021-0020, ЕГИСУ НИОКТР № 122011800086-1) с использованием оборудования ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН, грант № 13.ЦКП.21.0016.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рац М. В., Чернышев С. Н. Трещиноватость и свойства трещиноватых горных пород. М.: Недра, 1970. 164 с.
2. Лайхансурэ Б. К расчету оптимальных параметров взрывных работ с учетом трещиноватости массива // ГИАБ. 2008. Т. 14. № 1. С. 165–172.
3. Иудин М. М. О трещиноватости массива горных пород // ГИАБ. 2007. Т. 17. № 2. С. 279–283.
4. Deparis J., Fricout B., Jongmans D., Villemain T., Effendiantz L., Mathy A. Combined use of geophysical methods and remote techniques for characterizing the fracture network of a potentially unstable cliff site (the “Roche du Midi”, Vercors massif, France) // Journal of Geophysics and Engineering. 2008. Vol. 5(2). P. 147–157. <https://doi.org/10.1088/1742-2132/5/2/002>
5. Theune U., Rokosh D., Sacchi M. D., Schmitt D. R. Mapping fractures with GPR: A case study from Turtle Mountain // Geophysics. 2006. Vol. 71(5). P. B139–B150. <https://doi.org/10.1190/1.2335515>
6. Ding Ya-lei, Song Lei, Yang Wei-hao, Li Hai-peng. Permittivity and EM wave field of the stochastic broken rock and its applications // Proceedings of the 15th International Conference on Ground Penetrating Radar. Brussels, Belgium. 2014. P. 941–946. <https://doi.org/10.1109/icgpr.2014.6970565>
7. Yuan H., Montazeri M., Looms M. C., Nielsen L. Diffraction imaging of ground-penetrating radar data // Geophysics. 2019. Vol. 84 (3). P. H1–H12. <https://doi.org/10.1190/geo2018-0269.1>
8. Porsani J. L., Sauck W. A., Júnior A. O. S. GPR for mapping fractures and as a guide for the extraction of ornamental granite from a quarry: A case study from southern Brazil // Journal of Applied Geophysics. 2006. Vol. 58(3). P. 177–187. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2005.05.010>
9. Molron J., Linde N., Baron L., Selroos J.-O., Darcel C., Davy P. Which fractures are imaged with Ground Penetrating Radar? Results from an experiment in the Äspö Hardrock Laboratory, Sweden // Engineering Geology. 2020. Vol. 273. Article number 105674. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105674>
10. Jaworowski C., Lynne B. Y., Heasler H., Foley D., Smith I. J., Smith G. J. Detecting natural fractures with ground penetrating radar and airborne night-thermal infrared imagery around Old Faithful Geyser, Yellowstone National Park, USA // Geothermics. 2020. Vol. 85. Article number 101775. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2019.101775>
11. Seren A., Acikgoz A. D. Imaging fractures in a massive limestone with ground penetrating radar, Haymana, Turkey // Scientific Research and Essays. 2012. Vol. 7(40). P. 3368–3381. <https://doi.org/10.5897/SRE11.1877>
12. Elkarmoty M., Tinti F., Kasmaeeyazdi S., Giannino F., Bonduà S., Bruno R. Implementation of a Fracture Modeling Strategy Based on Georadar Survey in a Large Area of Limestone Quarry Bench // Geosciences. 2018. Vol. 8(12). P. 1–15. <https://doi.org/10.3390/geosciences8120481>
13. Warren C., Giannopoulos A., Giannakis I. gprMax: Open source software to simulate electromagnetic wave propagation for Ground Penetrating Radar // Computer Physics Communications. 2016. Vol. 209. P. 163–170. <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2016.08.020>
14. Соколов К. О. Разработка модели георадиолокационного разреза массива мерзлых горных пород с трещиной // Известия УГГУ. 2021. № 2(62). С. 134–139. <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2021-2-134-139>
15. Соколов К. О. Алгоритм обработки данных георадиолокации для выявления контуров деформационных геологических структур // ГИАБ. 2018. № 10. С. 138–144. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-10-0-138-144>

Статья поступила в редакцию 18 августа 2023 года

Development of a method for identifying cracks in permafrost rocks based on differentiation of GPR data

Kirill Olegovich SOKOLOV*

N. V. Chersky Mining Institute of the North of the Siberian Branch of RAS, Yakutsk, Republic of Sakha (Yakutia), Russia

Abstract

Relevance. The presence of cracks significantly affects the physical and mechanical properties of rocks, which must be taken into account when planning mining operations and building mining structures. In the conditions of the distribution of permafrost rocks, characteristic of the North-East of Russia, the study of fracturing is possible using the ground penetrating radar method, which is used to assess the structure of rock masses of placer deposits. The criteria for identifying cracks based on the characteristics of GPR wave fields are currently known, and the main problem preventing the full use of the GPR method for studying cracks in subsurface layers of rocks is the significant complexity of processing and interpreting GPR measurement data.

The purpose of the work is to develop a method for processing the results of ground penetrating radar measurements to identify cracks in frozen rocks.

Methods. Physical and computer modeling of GPR measurements of a rock mass with a fracture, differential calculus methods for analyzing the GPR wave field structure model.

Results and their scope. As a result of the research, based on an early developed model of the structure of the GPR wave field, the use of the differentiation operation for identifying cracks in permafrost rocks was justified. Special cases of rectilinear inclined and horizontal axes of in-phase of ground penetrating radar signals are considered and corresponding formulas are obtained for them. The theoretical results obtained were tested on computer and physical modeling data, as well as on field measurement data. An analysis of the features of the signals after differentiation was carried out, and the features of the original radargrams were noted, which may interfere with the reliable interpretation of the results obtained.

Conclusions. In the practice of processing data from ground penetrating radar measurements, the results of the research will make it possible to more quickly identify zones of increased fracturing in rocks. In the future, it is planned to develop an algorithm and software that implements it for mapping rock fractures using ground penetrating radar data.

Keywords: ground penetrating radar, crack, rocks, model, interpretation.

The work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (topic No. 0297-2021-0020, EGISU R&D No. 122011800086-1) using the equipment of the Common Use Center of the Federal Research Center YSC SB RAS, grant No. 13.CUC.21.0016.

REFERENCES

1. Rats M. V., Chernyshev S. N. 1970, Fractures and properties of fractured rocks. Moscow, 164 p. (*In Russ.*)
2. Laikhansure B. 2008, Towards the calculation of optimal parameters of blasting operations taking into account the fracturing of the massif. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mining information and analytical bulletin], vol. 14, no. 1, pp. 165–172. (*In Russ.*)
3. Iudin M. M. 2007, On the fracturing of rock massifs. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mining information and analytical bulletin], vol. 17, no. 2, pp. 279–283. (*In Russ.*)
4. Deparis J., Fricout B., Jongmans D., Villemin T., Effendiantz L., Mathy A. 2008, Combined use of geophysical methods and remote techniques for characterizing the fracture network of a potentially unstable cliff site (the "Roche du Midi", Vercors massif, France). *Journal of Geophysics and Engineering*, vol. 5 (2), pp. 147–157. <https://doi.org/10.1088/1742-2132/5/2/002>
5. Theune U., Rokosh D., Sacchi M. D., Schmitt D. R. 2006, Mapping fractures with GPR: A case study from Turtle Mountain. *Geophysics*, vol. 71 (5), pp. B139–B150. <https://doi.org/10.1190/1.2335515>
6. Ding Ya-lei, Song Lei, Yang Wei-hao, Li Hai-peng. 2014, Permittivity and EM wave field of the stochastic broken rock and its applications. Proceedings of the 15th International Conference on Ground Penetrating Radar. Brussels, pp. 941–946. <https://doi.org/10.1109/icgpr.2014.6970565>
7. Yuan H., Montazeri M., Looms M. C., Nielsen L. 2019, Diffraction imaging of ground-penetrating radar data. *Geophysics*, vol. 84 (3), pp. H1–H12. <https://doi.org/10.1190/geo2018-0269.1>
8. Porsani J. L., Sauck W. A., Júnior A. O. S. 2006, GPR for mapping fractures and as a guide for the extraction of ornamental granite from a quarry: A case study from southern Brazil. *Journal of Applied Geophysics*, vol. 58 (3), pp. 177–187. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2005.05.010>
9. Molron J., Linde N., Baron L., Selroos J. O., Darcel C., Davy P. 2020, Which fractures are imaged with Ground Penetrating Radar? Results from an experiment in the Äspö Hardrock Laboratory, Sweden. *Engineering Geology*, vol. 273, article number 105674. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105674>
10. Jaworowski C., Lynne B. Y., Heasler H., Foley D., Smith I. J., Smith G. J. 2020, Detecting natural fractures with ground penetrating radar and airborne night-thermal infrared imagery around Old Faithful Geyser, Yellowstone National Park, USA. *Geothermics*, vol. 85, article number 101775. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2019.101775>

*k.sokolov@ro.ru

11. Seren A., Acikgoz A. D. 2012, Imaging fractures in a massive limestone with ground penetrating radar, Haymana, Turkey. *Scientific Research and Essays*, vol. 7 (40), pp. 3368–3381. <https://doi.org/10.5897/SRE11.1877>
12. Elkarmoty M., Tinti F., Kasmaeeyazdi S., Giannino F., Bonduà S., Bruno R. 2018, Implementation of a Fracture Modeling Strategy Based on Georadar Survey in a Large Area of Limestone Quarry Bench. *Geosciences*, vol. 8 (12), pp. 1–15. <https://doi.org/10.3390/geosciences8120481>
13. Warren C., Giannopoulos A., Giannakis I. 2016, gprMax: Open-source software to simulate electromagnetic wave propagation for Ground Penetrating Radar. *Computer Physics Communications*, vol. 209, pp. 163–170. <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2016.08.020>
14. Sokolov K. O. 2021, Development of a model of a GPR section of a frozen rock mass with a crack. *Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta* [News of the Ural State Mining University], no. 2 (62), pp. 134–139. <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2021-2-134-139> (In Russ.)
15. Sokolov K. O. 2018, Algorithm for processing GPR data to identify the contours of deformation geological structures. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mining information and analytical bulletin], no. 10, pp. 138–144. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-10-0-138-144> (In Russ.)

The article was received on August 18, 2023

Лабораторные исследования и анализ математических моделей деформирования раздробленных соляных пород

Максим Анатольевич КАРАСЕВ*
Александр Александрович СЕЛИХОВ**
Андрей Константинович БЫЧИН***

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация

Актуальность. Для качественного прогноза напряженно-деформированного состояния массивов горных пород при разработке калийных и соляных рудников с камерно-столбовыми системами разработки с закладкой выработанного пространства, а также при других случаях применения раздробленных солей в качестве закладочных массивов необходимо учитывать влияние закладочного массива, что обуславливает актуальность исследования, посвященного лабораторным исследованиям механического отклика и анализу математических моделей деформирования раздробленных соляных пород, которыми обычно представлены закладочные массивы, используемые в указанных случаях.

Целью работы является анализ современных разработок в области математического и численного моделирования деформирования раздробленных соляных пород, а также определение их механического отклика при гидростатическом сжатии.

Методы проведения работы. В качестве основного метода теоретического исследования использовался анализ современных источников информации, связанных с тематикой исследования. Лабораторные исследования производились с использованием стандартного набора сит, а также универсальной сервогидравлической испытательной машины MTS 815.

Результаты работы. Рассмотрены следующие модели деформирования, используемые для описания механического отклика раздробленных соляных пород, а также примеры их использования: модель Кулона–Мора, модель двойного пластического упрочнения, модель С. А. Константиновой, модель С. Оливеллы и А. Генса и модель WIPP Salt. В рамках лабораторных исследований получены данные о модуле крупности материала, а также зависимости среднего давления от объемных деформаций и объемных деформаций от времени, кроме того, получены скорости ползучести для изучаемого материала при различных уровнях средних напряжений при условиях гидростатического сжатия.

Выводы. Дальнейшее развитие моделей закладочных массивов из раздробленных соляных пород для условий добычи полезных ископаемых предлагается осуществлять на основе описания поверхностей пластического течения с участком упрочнения/разупрочнения полученных в результате обширных лабораторных и полевых изысканий.

Ключевые слова: раздробленные соляные породы, гидрозакладка, геомеханика, модели деформирования, камерно-столбовая система разработки, закладочный массив, хранилище ядерных отходов, солеотвал.

Введение

Добыча полезных ископаемых на месторождениях водорастворимых руд не допускает попадания ненасыщенных рассолов и пресных вод в зону продуктивных пластов. Аварийные затопления с большой вероятностью могут привести к полной потере соляного рудника [1, 2]. Этот риск вынуждает применять камерно-столбовые системы разработки с закладкой выработанного пространства. Закладочный массив в отечественной практике наиболее часто создается двумя способами: механически и гидравлически. При этом состав закладочного массива

в среднем представлен галитовыми отходами или, иначе говоря, разрушенными соляными породами. В отечественной практике наибольший интерес возникал в отношении влияния закладочного массива на процесс деформирования и разрушения междукамерных целиков [3–8]. Согласно работе [3], закладочный массив, созданный механическим образом, начинает оказывать влияние на работу междукамерных целиков при степени заполнения отработанной камеры около 90 %, в это же время закладочный массив, созданный гидравлическим способом,

✉ Karasev_MA@pers.spmi.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-8939-0807>

**s225059@stud.spmi.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-8939-0807>

***Bychin_AK@pers.spmi.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-8939-0807>

благодаря кристаллизации пор и пустот в процессе отдачи обратного рассола, обладает большей жесткостью и начинает оказывать боковой отпор на целики при степени заполнения камер от 60 %. Стоит также учитывать, что материал, заложенный гидравлическим путем, дает как горизонтальную, так и вертикальную усадку (примерно 1,5 %), что, согласно работе [9], может быть устранено путем заполнения освободившегося пространства свежей порцией закладочной смеси.

Сотрудниками ОАО «Галургия» проводились крупные исследования закладочного массива [6]. Установлено, что относительные деформации в компрессионных испытаниях при средней крупности частиц менее 1 мм составляют 23 %, при этом для крупности от 3 до 10 мм относительные деформации равны 28 %, в это же время действующие напряжения для первого случая составляют около 9,5 МПа, а во втором – 9,3 МПа, т. е. жесткость материала возрастает с уменьшением крупности частиц. Аналогичная ситуация наблюдается в исследовании [10], где рассматривается активация или измельчение компонентов закладочной смеси. Для закладочных массивов установлены зависимости относительных деформаций и действующего напряжения от «возраста» [9]:

$$\varepsilon_0 = 0,27 + 0,77 \exp\left(\frac{t_3}{4,93}\right),$$

$$q_0 = 39[1 - \exp(-1,07 t_3)],$$

где t_3 – «возраст» закладочного массива.

Согласно этой зависимости, закладочный массив в первые три года после его возведения проходит стадию консолидации и далее деформируется, проявляя ползучие свойства, характерные для соляных пород.

Говоря о разрушенных соляных породах, следует обратить внимание на солеотвалы. Согласно работе [11], солеотвалы представлены рыхлыми породами, устойчивость которых после отсыпки обеспечивается только за счет сил трения между частицами. С течением времени солеотвалы уплотняются и цементируются по аналогии с гидрозакладочным массивом. Процесс этот неравномерный, и автор работы выделяет около трех зон, различных по физико-механическим характеристикам: на отсыпаемой части отвала раздробленные соляные породы практически не имеют прочности, пологий склон является зоной слабоупрочненных пород с пределом прочности на одноосное сжатие до 1 МПа, а «ядро» солеотвала составляют упрочненные породы с прочностью более 1,5 МПа. Зарубежные исследования представлены работой [12]. Состав исследуемых солеотвалов на 77,8 % представлен NaCl, остальные компоненты представлены солями калия, магния и нерастворимым остатками. Для исследуемого объекта характерно увеличение насыпной плотности раздробленных соляных пород по мере углубления в массив солеотвала, при этом пористость материала снижается от 0,32 в приповерхностной зоне до 0,1 на глубине примерно 45–50 м, аналогичная ситуация происходит с прочностью при сжатии – для образцов, отобранных на глубине 6,15 м, прочность составляет 2,05 МПа, а для глубины около 66 м прочность равняется 8,8 МПа.

Внимание зарубежных коллег относительно раздробленных соляных пород сфокусировано на их применении в качестве среды для хранения ядерных отходов. Отсюда выделяется специфика исследований, направленная на изучение изменения физико-механических характеристик раздробленных солей при различной степени уплотнения, температуры и влажности.

Исследованием уплотненных раздробленных солей занимались в работе [13]. Лабораторные исследования, представленные в статье, были направлены на получение зависимостей для пород проекта WIPP – хранилища ядерных отходов. Авторы рассматривали влияние динамического воздействия на уплотнение гранулированной соли, а также провели испытания на трехосное сжатие образцов цилиндрической формы размерами 102 мм в диаметре и высотой от 100 до 200 мм. Трехосное сжатие производилось по гидростатической схеме ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$), при этом фиксировались относительная плотность и модуль упругости. Гидростатическое давление в испытаниях составляло 10 и 15 МПа и повышалось ступенчато с разгрузочными петлями по достижении стабилизации уплотнения. Зависимость модуля упругости от плотности хорошо описывается уравнением, предложенным в работе [14]:

$$K = c \exp(bp),$$

где K – модуль упругости; ρ – плотность; c , b – эмпирические коэффициенты, которые для материала, используемого в проекте WIPP, составляют 5,69 и 0,101 соответственно.

В работе [15] исследовалась ползучесть закладочного материала хранилища WIPP для условий уплотнения при сдвиге при температуре 25 °С, влажности 1,5–2 % и удельной плотности 0,9. Для образцов с осевой нагрузкой 2,33 МПа выход на стабильные значения объемной ползучести наступает в момент между 3 и 3,5 сут, однако для осевой нагрузки 3,33 МПа достичь стабилизации объемной ползучести не удалось по техническим причинам ввиду чрезмерного накопления деформаций, испытания проводились при этом 12 сут. Анализ влияния повышенных температур вплоть до 250 °С на модуль деформации, пористость и другие физико-механические характеристики раздробленных солей представлен в работах [16–18]. Раздробленная соль приобретает плотность, идентичную ненарушенным соляным породам через 12 месяцев при давлении примерно 4 МПа [15].

Повышение достоверности прогноза геомеханических процессов при применении математических методов прогноза достигается за счет использования соответствующих для рассматриваемой задачи модели деформирования геоматериалов [19, 20], что справедливо и при рассмотрении раздробленной соли. На выбор модели деформирования раздробленных солей существенное влияние оказывают ее особенности механического поведения, которое, как показывает выполненный анализ, в значительной степени зависит от гранулометрического состава, влажности и температуры. Важно также учитывать, что материал теряет до трети и более своего объема под нагрузкой и активно проявляет свойства ползучести и релаксации. Таким образом, главной целью работы яв-

ляется изучение текущего уровня исследований в области прогноза напряженно-деформированного состояния искусственных массивов из разрушенных соляных пород на уровне элементарного объема. В работе основное внимание уделено анализу современного состояния моделей деформирования раздробленных пород, изучению их области применения и выявлению направления их совершенствования.

Исследование механического отклика раздробленных соляных пород. Любая модель требует обоснования параметром геоматериала. Изысканиям механического отклика соляных пород посвящены такие работы, как например [21, 22], однако исследования раздробленных соляных пород при различных траекториях нагружения проводились в малых объемах, а их механическое поведение недостаточно изучено. В рамках данной работы произведены лабораторные исследования материала раздробленных соляных пород при объемном сжатии по гидростатической схеме. Модуль крупности частиц при просеивании пробы массой 2 кг на стандартном наборе сит (5–2,5–1,25–0,63–0,315–0,16 мм) составил 0,88. Образцы подготавливались следующим образом: сыпучая раздробленная соляная порода перед испытанием высушивалась при температуре 105 °С в течение суток, затем происходила засыпка материала в специальные эластичные формы, при этом насыпная плотность составляла в

среднем 1338,36 кг/м³, размеры образцов соответствовали размерам стандартной заготовки и были одинаковы в каждом испытании (диаметр $d = 60,93$ мм, высота $h = 131,03$ мм). Испытания проводились с использованием сервогидравлической испытательной системы MTS 815 по многоступенчатой схеме по программе, представленной в табл. 1. Все оборудование проходит ежегодную поверку и регулярное обслуживание.

В результате проведенных испытаний получены следующие зависимости, представленные на рис. 1, 2.

Согласно рис. 2 определены скорости установившейся объемной ползучести, результаты представлены в табл. 2.

Анализ моделей деформирования разрушенных соляных пород. Задачи геомеханики деформирования разрушенных соляных пород могут быть разделены на две группы, где в рамках первой группы основное внимание уделяется вопросам определения предельных нагрузок на рассматриваемую геомеханическую систему, в то время как ко второй группе относятся модели, пригодные для повышения достоверности прогноза геомеханических процессов как в кратковременном, так и в длительном периодах. К моделям первой группы можно отнести модель Кулона–Мора и модель с двойным пластическим упрочнением. Например, в работе [3] для моделирования сыпучего закладочного массива применяется модель двойного пластического упрочнения, а для гидрозакладочного массива – модель Кулона–Мора. К моделям второй группы можно отнести математическую модель деформирования гидрозакладочного массива возрастом до 29 лет, разработанную в ОАО «Галургия» [23], а также модели раздробленных соляных пород, разработанные для прогноза геомеханических процессов в окрестности хранилищ ядерных отходов [24–28].

Модель Кулона–Мора является простой идеально упругопластической моделью и обычно применяется для пластичных или сыпучих пород, а также нашла применение для прогноза предельной нагрузки на междукамерные целики. Модель представляет собой билинейную зависимость касательных напряжений от нормальных. В осях главных напряжений модель Кулона–Мора представляет собой расширяющуюся шатровую неограниченную поверхность (рис. 3), в основании которой лежит шестиу-

Таблица 1. Программа проведения испытаний
Table 1. Test program

Номер ступени	Время набора давления $t_{\text{наб}}$, мин	Время выдержки давления $t_{\text{выд}}$, мин	Гидростатическое давление $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$, МПа
1	2	5	0,25
2	2	5	0,50
3	2	5	0,75
4	2	5	1,00
5	5	10	2,50
6	5	10	5,00
7	10	15	10,00
8	15	15	15,00
9	15	15	20,00

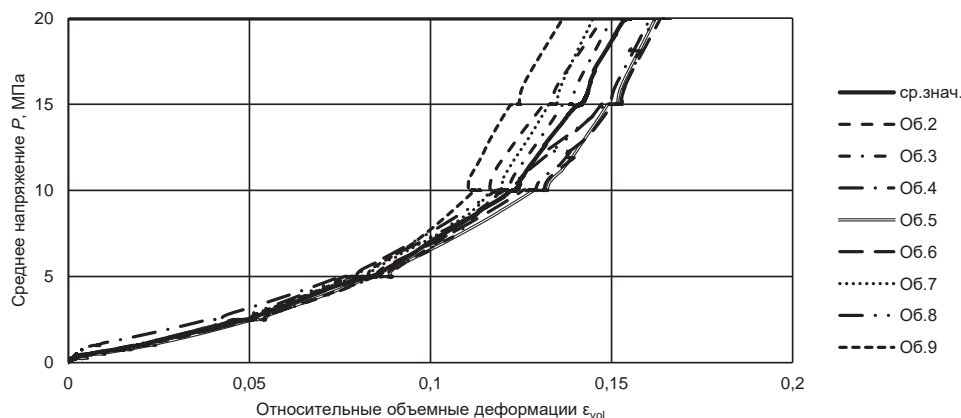


Рисунок 1. Зависимость средних напряжений от относительных объемных деформаций
Figure 1. Dependence of average stresses on relative volumetric strains

гольник. Критерий прочности Кулона–Мора выглядит следующим образом:

$$\tau = \sigma_n \operatorname{tg}(\varphi) + C,$$

где τ – касательные напряжения; σ_n – нормальные напряжения; C – сцепление (пересечение кривой критерия прочности с осью касательных напряжений на паспорте прочности породы); φ – угол внутреннего трения.

Модель Кулона–Мора часто используется для быстрых геомеханических расчетов, однако недостаточно корректно описывает реальное поведение геоматериала, завышая его прочностные свойства на стадии перехода от упругого поведения к пластическому, а также не учитывает реологическое поведение, свойственное соляным породам. Согласно [29], закладочные материалы под нагрузкой ведут себя нелинейно, на их напряженно-деформированное состояние влияет траектория нагружения, что требует применения более сложных моделей, нежели модель Кулона–Мора, таких, как например модель двойного пластического течения.

Модель Кулона–Мора использовалась при моделировании гидравлически размещенной закладки в работе [3]. В работе решалась плоская задача, рассматривалась нагрузка на целик в зависимости от степени заполнения камеры. Согласно расчетам, гидравлически размещенный закладочный массив начинает оказывать влияние на междуканальные целики при степени заполнения около 50 %, при полном заполнении камер гидравлически размещенным закладочным массивом целики имеют практически бесконечную несущую способность.

Модель двойного пластического упрочнения разработана специально для гидравлически размещенных, а также для слабоцементированных гранулированных материалов, к которым можно отнести гидрозакладочный массив. Данная модель [29] достаточно хорошо описывает материалы, в которых развиваются необратимые деформации до достижения материалом предельного состояния, иными словами, происходит упрочнение материала под нагрузкой. Модель двойного пластического упрочнения основана на совершенствовании модели Кулона–Мора с упрочнением/разупрочнением, однако в отличие от нее в пространстве главных напряжений модель двой-

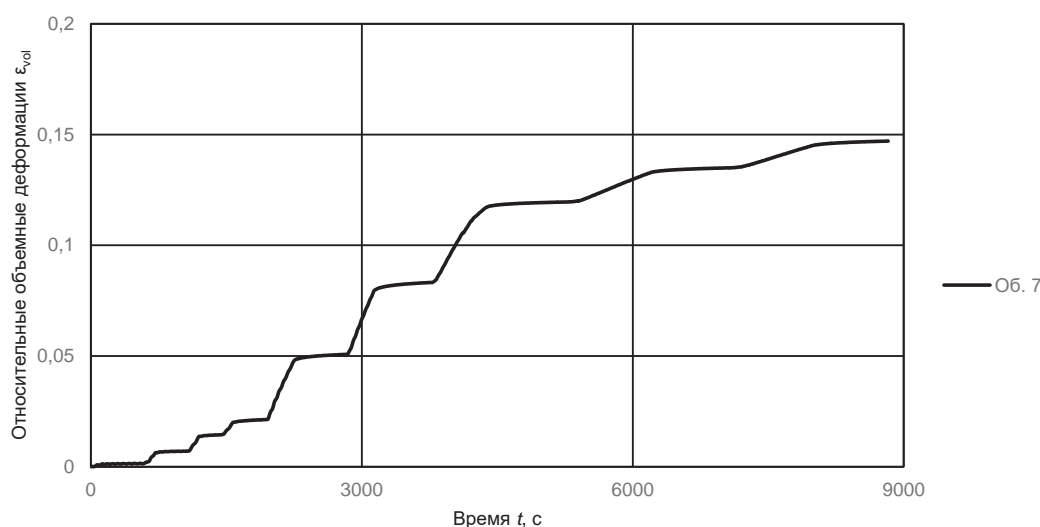


Рисунок 2. Зависимость относительных объемных деформаций от времени
Figure 2. Dependence of relative volumetric deformations on time

Таблица 2. Скорости установившейся объемной ползучести
Table 2. Rates of steady-state volumetric creep

Этап	Время начала t_1 , с	Время окончания t_2 , с	Начальные деформации ползучести ϵ_{vol1}^{cr} , мм	Конечные деформации ползучести ϵ_{vol2}^{cr} , мм	Гидростатическое давление ступени, $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$, МПа	Скорость ползучести $\dot{\epsilon}_{vol1}^{cr}$, мм/с
1	184	530	0,00701	0,00873	0,25	0,000004971
2	816	1100	0,00354	0,04220	0,50	0,000136127
3	1296	1482	0,08000	0,08730	0,75	0,000039247
4	1593	1967	0,11400	0,12600	1,00	0,000032086
5	2257	2853	0,26400	0,28200	2,50	0,000030201
6	3145	3706	0,41500	0,42900	5,00	0,000024955
7	4408	5281	0,55200	0,55360	10,00	0,00001833
8	6235	7078	0,55090	0,56190	15,00	0,000013049
9	7966	8823	0,56709	0,56829	20,00	0,00001400

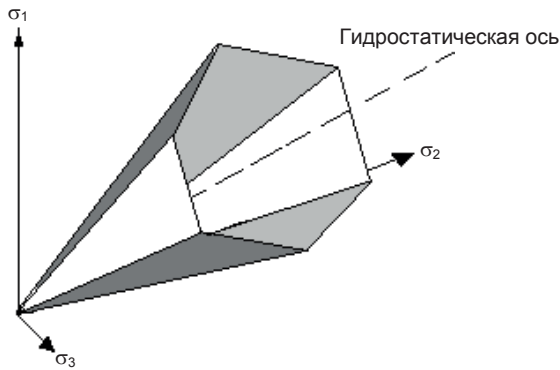


Рисунок 3. Шатровая поверхность модели Кулона–Мора в осях главных напряжений
Figure 3. Tent surface of the Coulomb–Mohr model in the axes of principal stresses

ного пластического упрочнения имеет «крышку» – часть, которая ограничивает поверхность пластического течения плоскостью перпендикулярной гидростатической оси. Данная «крышка» является объемной поверхностью текучести и определяет упрочнение от объемных пластических деформаций.

Полная деформация модели двойного пластического упрочнения [25]:

$$\Delta e_i = \Delta e_i^e + \Delta e_i^p,$$

где e_i^e – упругая составляющая деформации; e_i^p – пластическая составляющая деформации.

Пластическая деформация [25]:

$$\Delta e_i^p = \Delta e_i^{ps} + \Delta e_i^{pt} + \Delta e_i^{pv},$$

где Δe_i^{ps} – пластическая деформация сдвига; Δe_i^{pt} – пластическая деформация растяжения; Δe_i^{pv} – пластическая объемная деформация.

Функция пластического течения сдвига имеет вид [25]:

$$f^s = \sigma_1 - \sigma_3 N_\phi + 2c\sqrt{N_\phi},$$

$$N_\phi = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi},$$

где $\sigma_{1,3}$ – главные нормальные напряжения; c – сцепление; ϕ – угол внутреннего трения.

Функция пластического течения растяжения имеет вид [17]:

$$f = \sigma_{pp} - \sigma_3,$$

где σ_{pp} – прочность на растяжение.

Функция пластического объемного течения имеет вид [25]:

$$f^v = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) + p_c,$$

где p_c – давление «крышки», т. е. часть поверхности пластического течения в процессе упрочнения/разупрочнения материала.

Функции упрочнения/разупрочнения в модели двойного пластического упрочнения определяются пользователем в табличной форме. При этом в рамках поверхностей текучести при сдвиге и объемной деформации может происходить как упрочнение, так и разупрочнение, а при растяжении только разупрочнение [25].

Модель двойного пластического упрочнения использовалась для моделирования сухого закладочного массива из отходов соляного производства в работе [3]. При этом закладочный массив начинает оказывать влияние на междукламерный целик только при полном опускании кровли.

Говоря о механике соляных пород, следует также учитывать фактор реологии. Закладочные массивы или отвалы из раздробленных солей, как и ненарушенные соляные породы, обладают ползучестью, что показано в работе [24].

Еще одна модель разработана С. А. Константиновой [23] в процессе исследования гидрозакладочных массивов Верхнекамского месторождения калийно-магниевого солей. Модель описывает работу гидрозакладочного материала БПКРУ-1, в результате лабораторных испытаний автор определяет зависимости плотности, прочности на сжатие и растяжение в зависимости от «возраста» закладочного массива t [23]:

$$\rho(t) = 0,0139 + 7,5 \cdot 10^{-5} (t - 1);$$

$$\sigma_{сж} = 0,0004 t^3 - 0,0243 t^2 + 0,536 t + 0,4221;$$

$$\sigma_p = 0,079 + 5,36 \cdot 10^{-3} (t - 1),$$

где t – время; ρ – плотность; $\sigma_{сж}$ – прочность на сжатие; σ_p – прочность на растяжение.

На упругой стадии работы материала определяющие соотношения [23]:

$$\tilde{\sigma} = 2G\tilde{\epsilon}; \sigma = \frac{D}{1 - 2\mu} \epsilon; G = \frac{D}{2(1 + \mu)},$$

где $\tilde{\sigma}$ – девиатор напряжений; $\tilde{\epsilon}$ – девиатор деформаций; G – модуль сдвига; σ – среднее напряжение; μ – коэффициент Пуассона; ϵ – средняя деформация.

В качестве критерия разрушения используется соотношение [24]:

$$\sigma_3 = A - \sigma B,$$

где σ_3 – эквивалентное разрушающее напряжение; A, B – параметры, вычисляемые с помощью прочности на сжатие и растяжение [23].

В областях, подверженных разрушению, процесс деформирования моделируется переменным модулем деформации [23] по значениям критериев A и B , для остаточной прочности:

$$D = \frac{A_{ост} - \sigma B_{ост}}{\epsilon_i},$$

где ϵ_i – интенсивность нормальных деформаций.

Данная модель, по утверждению автора, занижает расчетную разрушающую деформацию гидрозакладки по

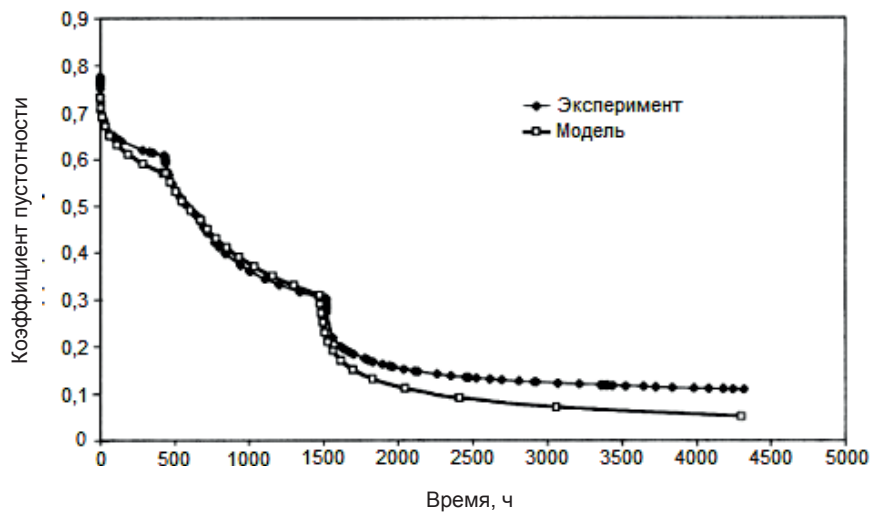


Рисунок 4. Зависимость коэффициента пустотности от времени [24]
 Figure 4. Dependence of void ratio on time [24]

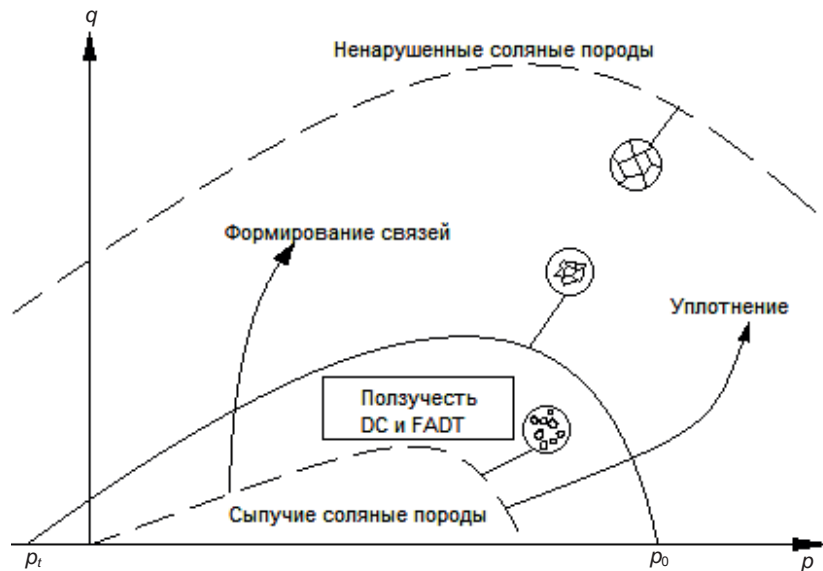


Рисунок 5. Механизм деформирования раздробленных соляных пород в осях девиаторных и средних напряжений [24]
 Figure 5. Mechanism of deformation of crushed salt rocks in the axes of deviatoric and average stresses [24]

сравнению с экспериментальными данными, особенно с учетом высокого бокового давления, так, например, при боковом давлении, равном 2 МПа, расчетная деформация равна 6,4 мм, в то время как экспериментально установленная составляет 11,2 мм.

Среди моделей зарубежных авторов следует выделить модель испанских исследователей С. Оливеллы и А. Генса, разработанную для измельченных соляных пород, представленную в работе [25]. Модель создана для решения термомеханических задач и основана на двух механизмах ползучести, таких как FADT – ползучесть при диффузном переносе жидкости (фильтрационная консолидация) и DC – ползучесть при сдвиге частиц (ползучесть скелета геоматериала), а также законе вязкопластического течения. Авторы сравнивали прогнозные данные модели с результатами компрессионных испытаний, получив хорошую сходимость (рис. 4).

Скорость деформации ползучести для данной модели записывается в виде [24]:

$$\frac{d\epsilon_{ij}^c}{dt} = \frac{d\epsilon_{ij}^{FADT}}{dt} + \frac{d\epsilon_{ij}^{DC}}{dt} = \frac{1}{2\eta_{FADT}^d} (\sigma'_{ij} - p'\delta_{ij}) + \frac{1}{3\eta_{FADT}^v} p'\delta_{ij} + \frac{1}{\eta_{DC}^d} \Phi(F) \frac{\partial G}{\partial \sigma'_{ij}},$$

где $d\epsilon/dt$ – скорость деформаций; η – коэффициент вязкости; p' – среднее напряжение; δ_{ij} – дельта Кронекера; σ'_{ij} – тензор эффективных напряжений; Φ – функция, используемая в вязкопластической модели; F – функция вязкопластической текучести; G – закон течения для вязкопластической модели; индексы V, d – объемная и девиаторная составляющие ползучести.

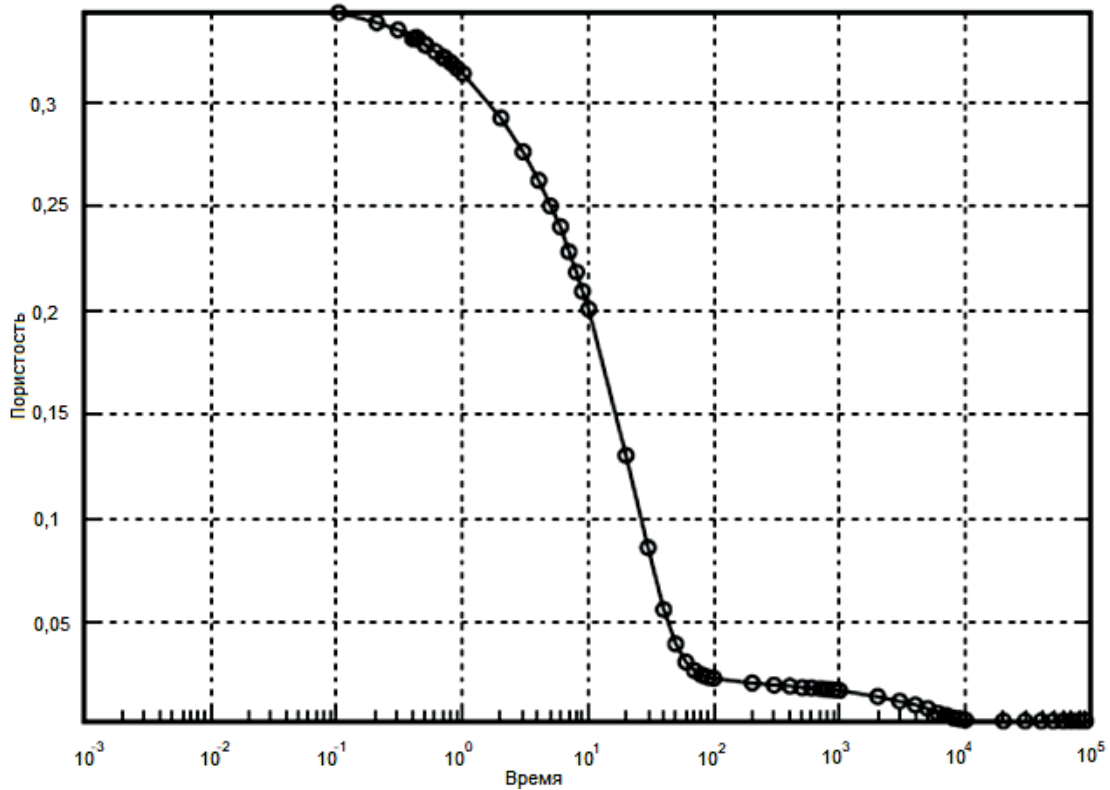


Рисунок 6. Перемещения контура выработки во времени [30]
 Figure 6. Movements of the excavation contour over time [30]

Закон вязкопластичности [24]:

$$\frac{d\epsilon_{ij}^{VP}}{dt} = \frac{1}{\eta_{VP}^d} \langle \Phi(F^{VP}) \rangle \frac{\partial F^{VP}}{\partial \sigma'_{ij}},$$

$$F^{VP} = \sqrt{q^2 + M^2(p' - p_t)(p' - p_0)},$$

где q – девиаторное напряжение; p_0, p_t – параметры упрочнения (значения средних напряжений); M – константа материала; индекс VP – вязкопластический характер деформирования.

На рис. 5 представлен механизм вязкопластического деформирования измельченной соли.

Модель С. Оливеллы и А. Генса использовалась в работе [30]. Модель была реализована в численном коде CODE_BRIGHT (Coupled Deformation BRIne Gas and HeatTransport problems) созданном специально для решения термомеханических задач. Решаемая задача представлена объемной моделью с пройденными на глубине 750 и 800 м выработками, в которых располагались емкости с радиоактивными отходами и закладочный материал.

В работе основной акцент сделан на исследовании влияния температуры на фильтрационно-механическое поведение закладочного массива и вмещающих пород. В работе представлены закономерности изменения температуры закладочного массива и горных пород во времени от момента размещения ядерных отходов и их засыпки раздробленными соляными породами на временном отрезке до 10 лет. При этом результаты моделирования

сравнивались с экспериментальными данными. Замер температур производился в четырех точках: кровле, стенках и почве выработки, а также на глубине 2,2 м относительно уровня почвы выработки.

Прогнозные и фиксированные в натуре значения хорошо согласуются в зоне кровли и стенок выработки, однако в месте непосредственного соприкосновения радиоактивных горячих отходов с почвой выработки и на глубине 2,2 м есть значительные отклонения в температуре, при этом прогнозные значения оказались меньше экспериментальных.

На рис. 6 представлены горизонтальные и вертикальные перемещения выработки во времени.

Горизонтальные перемещения контура в модели были выше зафиксированных в натуре на 50 %, согласованность вертикальных перемещений в модели и натуре была лучше, в первые пять лет разница была незначительной, затем натурные перемещения стали увеличиваться относительно прогнозных вплоть до 120 % последних.

В модели Г. Каллахана [26, 28], основанной на работах [31], рассматривается похожий механизм деформаций измельченной соли, основанный на ползучести при сдвиге частиц и ползучести при диффузном переносе жидкости. Тензор скорости неупругой деформации записывается в виде:

$$\dot{\epsilon}_{ij}^c = \frac{\dot{\epsilon}_{ij}^d \dot{\epsilon}_{ij}^w}{\sigma_{eq}} \left\{ \frac{k_0 \Omega^{k_1} \sigma_m \delta_{ij}}{3} + k_2 \left(\frac{2-D}{D} \right)^{2n(n+1)} \times \right. \\ \left. \times 2\sqrt{J_2} \cos \psi \left(\left[\frac{\cos 2\psi}{\cos 3\psi} \right] \frac{S_{ij}}{\sqrt{J_2}} + \left[\frac{\sqrt{3} \sin \psi}{J_2 \cos 3\psi} \right] t_{ij} \right) \right\},$$

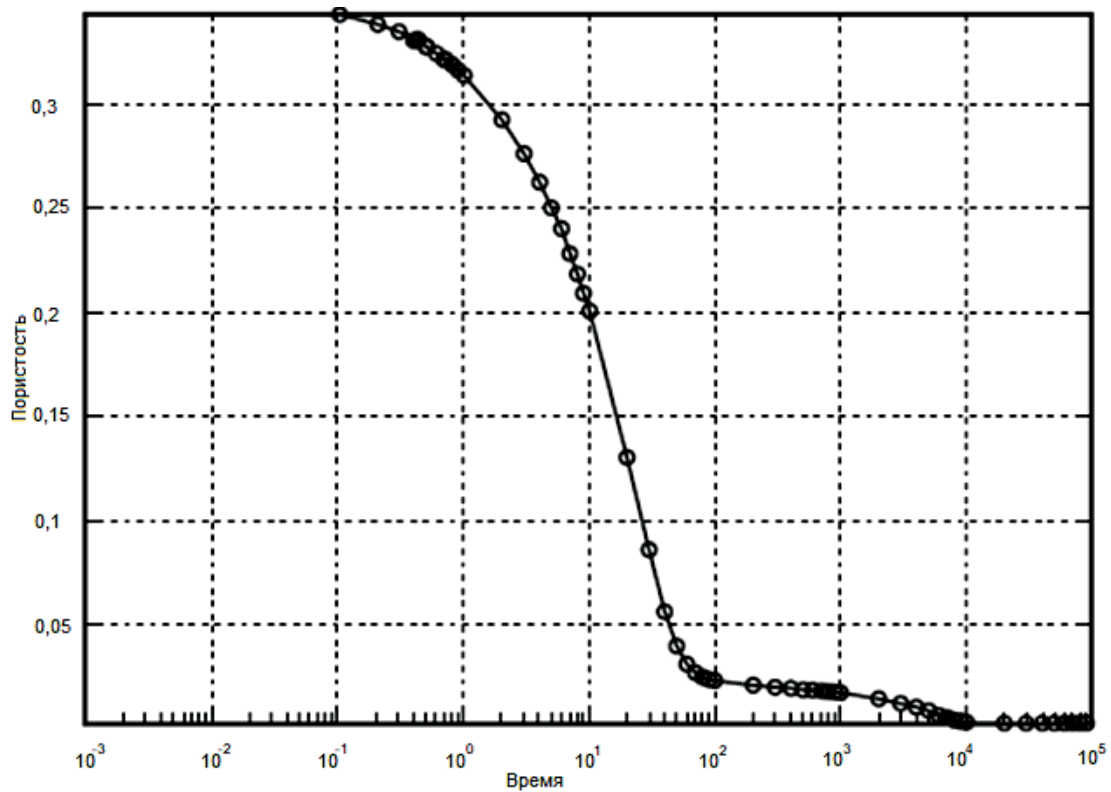


Рисунок 7. Изменение пористости закладочного массива во времени [33]
 Figure 7. Change in porosity of the backfill mass over time [33]

Таблица 3. Оценка применимости моделей для различных геомеханических задач
 Table 3. Assessment of the applicability of models for various geomechanical problems

Тип задач	Наименование моделей				
	Кулона–Мора	Двойного пластического упрочнения	Модель С. А. Константиновой	Модель С. Оливеллы и А. Генса	Модель Г. Каллахана (WIPP salt model)
Прогноз напряженно-деформированного состояния массива без учета фактора времени	+	+	+	+	+
Решение задач связанных с прогнозом длительных деформаций	–	–	+	+	+
Решение термомеханических задач	–	–	–	+	+

где D – фракционная плотность (отношение текущей плотности к максимально возможной для данного материала); ψ – угол Лоде; J_2 – второй вариант тензора напряжений; σ_m – среднее напряжение; $\eta_0, \eta_1, \eta_2, k_0, k_1, k_2, n$ – константы материала.

Скорость неупругой деформации при реализации механизма ползучести при сдвиге частиц записывается в виде:

$$\dot{\epsilon}_{ij}^d = F \dot{\epsilon}_s,$$

где F – функция перехода, отражающая три ветви: ветвь упрочнения, равновесия и восстановления; $\dot{\epsilon}_s$ – установившаяся скорость деформации.

Скорость неупругой деформации при реализации механизма ползучести при диффузном переносе жидкости [29]:

$$\Gamma = \begin{cases} 1, & \text{при малых деформациях } (\exp(\epsilon_v) - 1 > -15\%) \\ \left[\frac{\exp(\epsilon_v)}{\phi_0 \exp(\epsilon_v)} \right]^{n_s}, & \text{при больших деформациях } (\exp(\epsilon_v) - 1 < -15\%) \end{cases}$$

где $r_1, r_3, r_4, a, p, Q_s, n_s$ – константы материала; w – влажность; d – средний размер зерен; T – абсолютная температура; R – универсальная газовая постоянная; ϕ_0 – начальная пористость; ϵ_v – объемные деформации.

В настоящее время в программном пакете FLAC3D реализована модель WIPP Salt model [26], основанная на работах [32].

Согласно руководству [25], связь скоростей упругих напряжений и деформаций:

$$\dot{\sigma}_{ij} = 2G \left[\dot{\epsilon}_{ij}^e - \frac{\dot{\epsilon}_{kk}^e}{3} \delta_{ij} \right] + K \dot{\epsilon}_{kk}^e \delta_{ij},$$

где G – модуль сдвига; K – объемный модуль упругости.

Пример использования модели WIPP для решения термомеханической задачи представлен в работе [33]. В работе рассматривается осесимметричная плоская задача, геометрия представлена прямоугольной моделью высотой 1200 м и шириной 25 м, в центре модели расположена выработка с емкостью для хранения ядерных отходов, засыпанной закладочным материалом из раздробленных солей. Авторы проводили исследование температурного режима во вмещающих породах, закладочном массиве и самой емкости для хранения отходов. Помимо этого, в работе представлены расчеты значений пористости и порового давления в закладочном массиве во времени, однако экспериментальных измерений произведено не было, пример расчетов пористости закладочного массива (среднее значение в поперечном сечении выработки) представлен на рис. 7.

Заключение

В работе выполнен анализ моделей раздробленных соляных пород, которые нашли широкое применение в практике решения различных геомеханических задач (табл. 3).

Модели Кулона–Мора и двойного пластического упрочнения использовались для расчетов задач, связанных с нагружением междукамерных целиков добычных выработок калийных рудников, однако верификации с натурными данными не проводилось.

Модель С. А. Константиновой калибрована по ряду лабораторных и натуральных испытаний, однако, как отмечает автор, модель занижает расчетную разрушающую

деформацию гидрозакладки по сравнению с экспериментальными данными? особенно с учетом высокого бокового давления.

Модель С. Оливеллы и А. Генса дает большие погрешности при прогнозе деформаций выработки для захоронения ядерных отходов с учетом закладки выработанного пространства дробленными соляными породами.

Модель WIPP использовалась для решения задач термомеханики и прогноза деформаций выработки с учетом закладки выработанного пространства, однако верификации в рассмотренной работе [33] не проводилось, в то же время при создании данной модели проводились обширные лабораторные и полевые исследования, а сама модель внедрена в популярный расчетный комплекс FLAC.

Дальнейшее развитие моделей закладочных массивов из раздробленных соляных пород для условий добычи полезных ископаемых предлагается осуществлять на основе описания поверхностей пластического течения с участием упрочнения/разупрочнения полученных в результате обширных лабораторных и полевых изысканий.

В рамках лабораторных изысканий были получены зависимости среднего напряжения от относительных объемных деформаций и времени, а также была определена скорость установившейся ползучести на каждом этапе нагружения. В дальнейшем данные изыскания будут дополняться и использоваться для разработки модели деформирования, учитывающей различные траектории нагружения раздробленных соляных пород.

ЛИТЕРАТУРА

1. Барях А. А., Евсеев А. В. Ликвидация калийных рудников и соляных шахт: обзор и анализ проблемы // ГИАБ. 2019. № 9. С. 5–29. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-09-0-5-29>
2. Рыбак Я., Хайрутдинов М. М., Кузиев Д. А., Конгар-Сюрюн Ч. Б., Бабырь Н. В. Прогнозирование геомеханического состояния массива при отработке соляных месторождений с закладкой // Записки Горного института. 2022. Т. 253. С. 61–70. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.2>
3. Ковальский Е. Р., Громцев К. В., Петров Д. Н. Моделирование процесса деформирования междукамерных целиков в условиях закладки очистных камер // ГИАБ. 2020. № 9. С. 87–101. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-9-0-87-101>
4. Константинова С. А., Ваулина И. Б. Влияние закладки выработанного пространства на напряженно-деформированное состояние карналлитовых междукамерных целиков // Известия ТулГУ. Науки о Земле. 2012. № 1. С. 71–76.
5. Лобанов С. Ю., Шумихина А. Ю. О влиянии свойств закладки на несущую способность междукамерных целиков // ГИАБ. 2011. № 4. С. 24–27.
6. Великов А. А., Беляков Н. А. Методика прогноза напряженно-деформированного состояния междукамерных целиков, закрепленных податливой тросовой крепью // ГИАБ. 2023. № 4. С. 20–34. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_4_0_20
7. Барях А. А., Асанов В. А., Санфиоров И. А. Методика контроля устойчивости соляных междукамерных целиков // Записки Горного института. 2013. Т. 205. С. 134–138.
8. Санковский А. А., Ковальский Е. Р. Оценка параметров напряженно-деформированного состояния массива в окрестности очистных камер // Записки Горного института. 2014. Т. 207. С. 63–65.
9. Гилев М. В., Константинова С. А., Мараков В. Е., Чернопазов С. А. Закладка выработанного пространства при разработке сильвинитовых пластов на Верхнекамских рудниках как конструктивный элемент системы разработки, позволяющий повысить коэффициент извлечения полезного ископаемого из недр // Маркшейдерский вестник. 2007. № 1. С. 33–40.
10. Конгар-Сюрюн Ч. Б., Фараджов В. В., Тюляева В. С., Хайрутдинов А. М. Исследование влияния активационной обработки на галитовые отходы обогащения при приготовлении закладочной смеси // ГИАБ. 2021. № 1. С. 43–57. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2021-1-0-43-57>
11. Николаева Т. Н. Инженерно-геологическое обоснование рационального размещения отходов калийного производства: дис. ... геол.-минерал. наук. СПб: СПбГГИ, 1998. 135 с.
12. Yubero M. T., Olivella S., Gens A., Bonet E., Lloret A., Alfonso P. Analysis of the process of compaction movements of deposits of crushed salt tailings // Engineering Geology. 2021. Vol. 293. Article number 106290. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106290>
13. Brodsky N. S., Hansen F. D., Pfeifle T. W. Properties of dynamically compacted WIPP salt. Albuquerque, NM (USA): Sandia National Labs. (SNL-NM). 1996. issue SAND-96-0838C; CONF-9606115-6. 15 p. URL: <https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc669714/m1/15/>
14. Sjaardema G. D., Kreig R. D. A constitutive model for the consolidation of WIPP (Waste Isolation Pilot Plant) crushed salt and its use in analyses of backfilled shaft and drift configurations. Albuquerque, NM (USA): Sandia National Labs., 1987. Issue SAND-87-1977. 68 p.
15. Somtong S., Khamrat S., Fuenkajorn K. Laboratory performance assessment of consolidated crushed salt for backfill material in potash mine openings // Engineering Journal of Research and Development. 2015. Vol. 26. No. 1. P. 15–22.
16. Paneru L. P., Bauer S. J., Stormont J. C. Thermal properties of consolidated granular salt as a backfill material // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2018. Vol. 51. P. 911–923. <https://doi.org/10.1007/s00603-017-1353-5>
17. Broome S. T., Bauer S. J., Hansen F. D., Mills M. Mechanical response and microprocesses of reconsolidating crushed salt at elevated temperature // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2015. Vol. 48. P. 2615–2629. <https://doi.org/10.1007/s00603-015-0840-9>

18. Bauer S. J., Urquhart A. R. Thermal and physical properties of reconsolidated crushed rock salt as a function of porosity and temperature // *Acta Geotechnica*. 2016. Vol. 11. P. 913–924. <https://doi.org/10.1007/s11440-015-0414-8>
19. Протосеня А. Г., Катеров А. М. Обоснование параметров реологической модели соляного массива // ГИАБ. 2023. № 3. С. 16–28. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_3_0_16
20. Karasev M. A., Protosenya A. G., Katerov A. M., Petrushin V. V. Analysis of shaft lining stress state in anhydrite-rock salt transition zone // *Rudarsko Geološko Naftni Zbornik (The Mining-Geology-Petroleum Engineering Bulletin)*. 2022. Vol. 37. No. 1. P. 151–162. <https://doi.org/10.17794/rgn.2022.1.13>
21. Козловский Е. Я., Журавков М. А. Определение и верификация параметров расчетной модели соляных пород с учетом разупрочнения и ползучести // *Записки Горного института*. 2021. Т. 247. С. 33–38. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.1.4>
22. Паньков И. Л., Морозов И. А. Деформирование соляных пород при объемном многоступенчатом нагружении // *Записки Горного института*. 2019. Т. 239. С. 510–519. <https://doi.org/10.31897/pmi.2019.5.510>
23. Константинова С. А., Чернопазов С. А., Асанов В. А. Математическая модель состояния закладочного массива на Верхнекамском месторождении калийных солей // *Известия вузов. Горный журнал*. 2010. № 1. С. 44–49.
24. Olivella S., Gens A. A constitutive model for crushed salt // *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics*. 2002. Vol. 26. Issue 7. P. 719–746. <https://doi.org/10.1002/NAG.220>
25. Program guide – FLAC3D 7.0 documentation. URL: https://docs.itascacg.com/flac3d700/common/docproject/source/manual/program_guide/program_guide.html?node67cg.com
26. Callahan G. D., Mellegard K. D., Hansen F. D. Constitutive behavior of reconsolidating crushed salt. Albuquerque, NM (USA): Sandia National Lab. (SNL-NM), 1998. Issue SAND-98-0179C; CONF-980620. 15 p.
27. Van Sambeek L. L. Testing and modelling of backfill used in salt and potash mines // *Proceedings of the Rock Support in Mining and Underground Construction*. Balkema, Rotterdam, 1992. P. 583–589.
28. Callahan G. D., Loken M. C., Hurtado L. D., Hansen F. D. Evaluation of constitutive models for crushed salt. Albuquerque, NM (USA): Sandia National Labs., 1996. Issue SAND-96-0791C. 14 p.
29. Yan B., Che S., Tannant D. D., Ren F., Wang P. Application of double-yield model in numerical simulation of stability of mining filling body // *Arabian Journal of Geosciences*. 2019. Vol. 12. P. 1–17. <https://doi.org/10.1007/s12517-019-4679-3>
30. Olivella S., Gens A. Thermomechanical modelling of the behaviour of drifts in rock salt // *The Mechanical Behavior of Salt—Understanding of THMC Processes in Salt*. Boca Raton, Florida, USA: CRC Press, 2017. P. 185–194. <https://doi.org/10.1201/9781315106502-21>
31. Zeuch D. H. Isostatic hot-pressing mechanism maps for pure and natural sodium chloride – applications to nuclear waste isolation in bedded and domal salt formations // *International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts*. 1990. Vol. 27. Issue 6. P. 505–524. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(90\)91002-O](https://doi.org/10.1016/0148-9062(90)91002-O)
32. Callahan G. D., DeVries K. L. Analysis of Backfilled Transuranic Waste Storage Rooms, RE/SPEC, Inc.: report. Albuquerque, NM (USA): Sandia National Labs., 1991. Issue SAND91-7052.
33. Blanco-Martín L., Rutqvist J., Battistelli A., Birkholzer J. T. Coupled processes modeling in rock salt and crushed salt including halite solubility constraints: Application to disposal of heat-generating nuclear waste // *Transport in Porous Media*. 2018. Vol. 124. P. 159–182. <https://doi.org/10.1007/s11242-018-1057-7>

Статья поступила в редакцию 03 июня 2023 года

Laboratory tests and analysis of mathematical models of deformation of crushed salt rocks

Maksim Anatol'evich KARASEV*
Aleksandr Aleksandrovich SELIKHOV**
Andrey Konstantinovich BYCHIN***

Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

Abstract

Relevance of the work. For a qualitative prediction of the stress-strain state of host rock massifs during the development of potash and salt mines with chamber-pillar mining systems with the backfilling of the excavated space, as well as in other cases of the use of crushed salts as the backfilling masses, it is necessary to take into account the influence of the backfill massive, which determines the relevance of the study devoted to the laboratory tests and analysis of mathematical models of deformation of crushed salt rocks, which usually represent the backfilling massifs used in these cases.

The purpose of the work is to analyze situation in the field of mathematical and numerical modeling of deformation of crushed salt rock and investigation of mechanical response of crushed salt rock under hydrostatic conditions.

Methods. As the main method of theoretical research, the analysis of modern sources of information related to the subject of the study was used. Laboratory tests were carried out using a standard set of sieves and universal test machine MTS 815.

Results. The paper considers the following deformation models used to describe the mechanical response of crushed salt rocks, as well as examples of their use: the Mohr-Coulomb model, the model of double plastic hardening, the S. A. Konstantinova model, the S. Olivella and A. Gens model, and the WIPP Salt model. As part of laboratory studies, data were obtained on the material size modulus, as well as the dependence of the medium pressure on volumetric deformations and volumetric deformations on time, in addition, creep rates for the studied material were obtained at various levels of average stresses under hydrostatic compression conditions.

Conclusions. It is proposed to carry out further development of models of crushed salt rocks for mining conditions based on the description of plastic flow surfaces with a hardening/softening area obtained as a result of extensive laboratory and field surveys.

Keywords: crushed salt rocks, hydraulic backfilling material, geomechanics, deformation models, chamber-pillar mining system, backfilling massive, nuclear waste storage, salt landfill.

REFERENCES

1. Baryakh A. A., Evseev A. V. 2019. Liquidation of potash mines and salt mines: review and analysis of the problem. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mining information and analytical bulletin], no. 9, pp. 5–29. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-09-0-5-29>
2. Rybak Y., Khairutdinov M. M., Kuziev D. A., Kongar-Syuryun Ch. B., Babyr N. V. 2022. Prediction of the geomechanical state of the massif during the development of salt deposits with backfilling. *Zapiski Gornogo instituta* [Notes of the Mining Institute], vol. 253, pp. 61–70. (In Russ.) <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.2>
3. Kovalsky E. R., Gromtsev K. V., Petrov D. N. 2020. Modeling the process of deformation of inter-chamber pillars under the conditions of laying cleaning chambers. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mining information and analytical bulletin], no. 9, pp. 87–101. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-9-0-87-101>
4. Konstantinova S. A., Vaulina I. B. 2012. Influence of backfilling of mined-out space on the stress-strain state of carnallite inter-chamber pillars. *Izvestiya TulGU. Nauki o Zemle* [News of the Tula State University. Geosciences], no. 1, pp. 71–76. (In Russ.)
5. Lobanov S. Yu., Shumikhina A. Yu. 2011. On the influence of backfill properties on the bearing capacity of inter-chamber pillars. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mining information and analytical bulletin], no. 4, pp. 24–27. (In Russ.)
6. Belikov A. A., Belyakov N. A. 2023. Methodology for predicting the stress-strain state of inter-chamber pillars secured with pliable cable support. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mining information and analytical bulletin], no. 4, pp. 20–34. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_4_0_20
7. Baryakh A. A., Asanov V. A., Sanfirov I. A. 2013. Methodology for monitoring the stability of salt inter-chamber pillars. *Zapiski Gornogo instituta* [Notes of the Mining Institute], vol. 205, pp. 134–138. (In Russ.)
8. Sankovsky A. A., Kovalsky E. R. 2014. Estimation of the parameters of the stress-strain state of the massif in the vicinity of the treatment chambers. *Zapiski Gornogo instituta* [Notes of the Mining Institute], vol. 207, pp. 63–65. (In Russ.)

✉ Karasev_MA@pers.spmi.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-8939-0807>

**s225059@stud.spmi.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-8939-0807>

***Bychin_AK@pers.spmi.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-8939-0807>

9. Gilev M. V., Konstantinova S. A., Marakov V. E., Chernopazov S. A. 2007, Backfilling of mined-out space during the development of sylvinitic layers in the Verkhnekamsk mines as a structural element of the development system, allowing to increase the coefficient of mineral extraction from subsoil. *Marksheyderskiy vestnik* [Surveyor's Bulletin], no. 1, pp. 33–40. (In Russ.)
10. Kongar-Syuryun Ch. B., Faradzov V. V., Tyulyaeva V. S., Khairutdinov A. M. 2021, Study of the influence of activation treatment on halite enrichment waste during the preparation of the filling mixture. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mining information and analytical bulletin], no. 1, pp. 43–57. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2021-1-0-43-57>
11. Nikolaeva T. N. 1998, Engineering-geological justification for the rational disposal of potash production waste. PhD thesis, Saint Petersburg, 135 p. (In Russ.)
12. Yubero M. T., Olivella S., Gens A., Bonet E., Lloret A., Alfonso P. 2021, Analysis of the process of compaction movements of deposits of crushed salt tailings. *Engineering Geology*, vol. 293. Article number 106290. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106290>
13. Brodsky N. S., Hansen F. D., Pfeifle T. W. 1996, Properties of dynamically compacted WIPP salt. Albuquerque, NM (USA): Sandia National Labs. (SNL-NM), issue SAND-96-0838C; CONF-9606115-6, 15 p. URL: <https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc669714/m1/15/>
14. Sjaardema G. D., Kreig R. D. 1987, A constitutive model for the consolidation of WIPP (Waste Isolation Pilot Plant) crushed salt and its use in analyses of backfilled shaft and drift configurations. Albuquerque, NM (USA): Sandia National Labs., issue SAND-87-1977, 68 p.
15. Somtong S., Khamrat S., Fuenkajorn K. 2015, Laboratory performance assessment of consolidated crushed salt for backfill material in potash mine openings. *Engineering Journal of Research and Development*, vol. 26, no. 1, pp. 15–22.
16. Paneru L. P., Bauer S. J., Stormont J. C. 2018, Thermal properties of consolidated granular salt as a backfill material. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, vol. 51, pp. 911–923. <https://doi.org/10.1007/s00603-017-1353-5>
17. Broome S. T., Bauer S. J., Hansen F. D., Mills M. M. 2015, Mechanical response and microprocesses of reconsolidating crushed salt at elevated temperature. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, vol. 48, pp. 2615–2629. <https://doi.org/10.1007/s00603-015-0840-9>
18. Bauer S. J., Urquhart A. R. 2016, Thermal and physical properties of reconsolidated crushed rock salt as a function of porosity and temperature. *Acta Geotechnica*, vol. 11, pp. 913–924. <https://doi.org/10.1007/s11440-015-0414-8>
19. Protosenya A. G., Katerov A. M. 2023, Justification of the parameters of the rheological model of the salt massif. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mining information and analytical bulletin], no. 3, pp. 16–28. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_3_0_16
20. Karasev M. A., Protosenya A. G., Katerov A. M., Petrushin V. V. 2022, Analysis of shaft lining stress state in anhydrite-rock salt transition zone. *Rudarsko Geološko Naftni Zbornik* [The Mining-Geology-Petroleum Engineering Bulletin], vol. 37, no. 1, pp. 151–162. <https://doi.org/10.17794/rgn.2022.1.13>
21. Kozlovsky E. Ya., Zhuravkov M. A. 2021, Determination and verification of parameters of the calculation model of salt rocks taking into account softening and creep. *Zapiski Gornogo instituta* [Notes of the Mining Institute], vol. 247, pp. 33–38. (In Russ.) <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.1.4>
22. Pankov I. L., Morozov I. A. 2019, Deformation of salt rocks under volumetric multistage loading. *Zapiski Gornogo instituta* [Notes of the Mining Institute], vol. 239, pp. 510–519. (In Russ.) <https://doi.org/10.31897/pmi.2019.5.510>
23. Konstantinova S. A., Chernopazov S. A., Asanov V. A. 2010, Mathematical model of the state of the backfill mass at the Verkhnekamsk potassium salt deposit. *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal* [News of the universities. Mining journal], no. 1, pp. 44–49. (In Russ.)
24. Olivella S., Gens A. 2002, A constitutive model for crushed salt. *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, vol. 26, issue 7, pp. 719–746. <https://doi.org/10.1002/NAG.220>
25. Program guide – FLAC3D 7.0 documentation. URL: https://docs.itascacg.com/flac3d700/common/docproject/source/manual/program_guide/program_guide.html?node67cg.com
26. Callahan G. D., Mellegard K. D., Hansen F. D. 1998, Constitutive behavior of reconsolidating crushed salt. Albuquerque, NM (USA): Sandia National Lab. (SNL-NM), issue SAND-98-0179C; CONF-980620, 15 p.
27. Van Sambeek L. L. 1992, Testing and modelling of backfill used in salt and potash mines. Proceedings of the Rock Support in Mining and Underground Construction. Balkema, Rotterdam, pp. 583–589.
28. Callahan G. D., Loken M. C., Hurtado L. D., Hansen F. D. 1996, Evaluation of constitutive models for crushed salt. Albuquerque, NM (USA): Sandia National Labs., issue SAND-96-0791C, 14 p.
29. Yan B., Che S., Tannant D. D., Ren F., Wang P. 2019, Application of double-yield model in numerical simulation of stability of mining filling body. *Arabian Journal of Geosciences*, vol. 12, pp. 1–17. <https://doi.org/10.1007/s12517-019-4679-3>
30. Olivella S., Gens A. 2017, Thermomechanical modelling of the behaviour of drifts in rock salt. The Mechanical Behavior of Salt—Understanding of THMC Processes in Salt. Boca Raton, Florida, USA: CRC Press, pp. 185–194. <https://doi.org/10.1201/9781315106502-21>
31. Zeuch D. H. 1990, Isostatic hot-pressing mechanism maps for pure and natural sodium chloride – applications to nuclear waste isolation in bedded and domal salt formations. *International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts*, vol. 27, issue 6, pp. 505–524. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(90\)91002-O](https://doi.org/10.1016/0148-9062(90)91002-O)
32. Callahan G. D., DeVries K. L. 1991, Analysis of Backfilled Transuranic Waste Storage Rooms, RE/SPEC, Inc.: report. Albuquerque, NM (USA): Sandia National Labs., issue SAND91-7052.
33. Blanco-Martín L., Rutqvist J., Battistelli A., Birkholzer J. T. 2018, Coupled processes modeling in rock salt and crushed salt including halite solubility constraints: Application to disposal of heat-generating nuclear waste. *Transport in Porous Media*, vol. 124, pp. 159–182. <https://doi.org/10.1007/s11242-018-1057-7>

The article was received on June 03, 2023

О гидротермальной природе кремней в отложениях артинского яруса Предуралья

Алексей Васильевич КУЗИН*

Евгений Юрьевич ЛОБАНОВ**

Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия

Аннотация

Актуальность. Приведены результаты палеонтологических, геофизических, минераграфических исследований кремней в отложениях артинского яруса в Предуралье.

Цель работ. Исследованы рифовые органогенные постройки с окремненными известняками и кремнями, окремненные песчаники и инъекции кремней в них. Цель – показать гидротермальную природу инъекций кремней в рифы, песчаники.

Методы исследований. Геофизические электроразведочные исследования рифовых известняков с целью выделения участков окремнения, геологическое и палеонтологическое картирование рифов, биостром, биогерм, песчаников, участков скопления конкреций и желваков кремней, исследование аншлифов окремненных пород, изготовление шлифов и их минераграфическое изучение.

Результаты работ. Палеонтологическое картирование рифовой постройки позволило установить различный видовой состав, размеры, сохранность биоты в прибрежной, вершинной и внешней частях рифа. Минераграфическими исследованиями установлена высокотемпературная гидротермальная природа кремней во всех видах осадков. Гидротермальные инъекции кремней в слои песчаников происходят по типу диффузии с формированием кремнистых конкреций и колец Лизиганга в песчаниках. Интенсивное внедрение гидротерм кремния в слои песчаников формируют в них участки окремнения в виде лакколлитов размером в десятки метров. Установлена различная степень освоения морской фауны кремневых гидротерм. Кремни могут включать малочисленные экземпляры мелкой фауны, быть насыщенной фауной хорошей сохранности, включать слои биоты, перекрытой слоями кремней, покрытых новыми колониями микроорганизмов. Иногда в кремнях встречаются только обломки раковин фауны, попавшие в горячий гель кремней.

Выводы. Гидротермы кремневого состава в морских рыхлых осадках могли быть условием развития биоты и основанием для рифовых построек. Повышенные значения удельного электрического сопротивления кремней и окремненных известняков позволяют электроразведкой исследовать внутреннюю структуру рифов. Высказано предположение о существовании в карбоне и ранней перми в Предуралье гидротермального пояса протяженностью от Кунгура до Стерлитамака.

Ключевые слова: кремни, окремненные песчаники, осадконакопление, гидротермы, палеонтология, минераграфия, электроразведка.

Цель исследований

Цель исследований изначально была несколько иной, чем итог, обозначенный в названии статьи. Для привлечения студентов УГГУ к научным исследованиям мы решили провести зимой 2021 г. и весной 2022 г. геофизические исследования рифовой постройки на западной окраине пос. Приданниково в 5 км севернее Красноуфимска (рис. 1). Цель научной публикации этой статьи – показать гидротермальную природу инъекций кремней в толщу рифовых карбонатных построек, песчаников из глубинных магматических источников в недрах Предуралья.

Наличие кремней в известняках, песчаниках, мергелях Предуральского прогиба отмечали многие исследователи. В. П. Маслов [1] изучал их в шлифах, выделил три типа окремнения, разделил на «первичные» – отлагающиеся

вместе с органогенным материалом в виде «коагуляции кремневого геля на дне моря», и в виде вторичных корочек халцедона «благодаря приносу его в коллоидном растворе». Источник кремнезема «надо считать неорганическим (?)».

Г. А. Мизенс [2], описывая биогермы с прослоями кремния, включающими радиолярии, спикулы губок, растительный детрит, назвал их первичными седиментогенными образованиями.

Б. И. Чувашов и др. [3–5] в разрезах верхнего карбона и нижней перми среди рифовых и стратифицированных карбонатных и терригенных отложений на глубинах от поверхности до 350 м описывали слои окремненных пород мощностью в первые метры. Это, на наш взгляд, свидетельства многократных спора-

*kuzin-av@mail.ru

**aziat1966@mail.ru



Рисунок 1. Схема расположения участков исследований (красные звездочки): 1 – Афанасьевское; 2 – Подгорная; 3 – Приданниково; схема отложений артинского яруса (по В. Д. Наливкину [7, 8]): с запада на восток – морские известняки Уфимского плато, мергели с известняковыми рифами (белые круги), песчаники, конгломераты и песчаники
Figure 1. Layout of research sites (red stars): 1 – Afanasyevskoye; 2 – Podgornaya; 3 – Pridannikovo; scheme of deposits of the Artinskian stage (according to V. D. Nalivkin [7, 8]): from west to east – marine limestones of the Ufa plateau, marls with limestone reefs (white circles), sandstones, conglomerates and sandstones

дических проявлений окремнения в Предуральском прогибе.

На восточном фланге рифа Шахтау [6] в 1968 г. описаны окремненные известняки, генезис которых А. Г. Баранников предположительно связывал с проявлением эпохи гипергенного окремнения на Урале.

В коллективной монографии «Геология «Предуралья» приводится обширный перечень пунктов (разрез «Красноуфимский», разрез «Аскын», Камайские Зубцы, камни Коронка, Ермак, Межевой Лог, Белый Клык и Бастионы, разрезы Водокачка, Ферма, Камайский Лог и др), где в отложениях среднего карбона, артинского, кунгурского ярусов перми наблюдаются участки окремнения известняков, песчаников с фауной, подобно представленным на участках Приданниково, Подгорная, Афанасьевское. О генезисе кремней сказано: «Окремнение пород первичное и приурочено к скоплениям кремневых губок или их спикул...».

Мы, исследуя публикации коллег-палеонтологов, обратили внимание на то, что в карбонатных толщах часто наиболее богатая по видам и родам фауна приурочена к слоям и постройкам окремненных известняков: это отмечается в известняках среднего карбона на западе Урала [9], в известняках визейского возраста на Южном Урале [10], в известняках силура и девона на Гиссарском хребте в Узбекистане [11]. На эту возможную парагенетическую связь кремневых гидротерм и рифовых построек обращаем особое внимание.

Ю. А. Кисин [12] отмечал интенсивное окремнение слоистых известняков в юго-западной части Пудлингового карьера (Уфимское плато, в 16 км к юго-западу от Красноуфимска). Окремнение располагается в зоне брекчирования известняков, дислокаций растяжения, наклона их залегания до 25°. Этому исследователю, мы уверены, не покажется неожиданным наше заявление о гидротермальной природе кремней в осадках Предуральского прогиба: в известняках на Уфимском плато он выявил «ми-

нералогическую аномалию» из гипогенных метаморфических минералов, брекчированные известняки, кольцевые и радиально-лучистые структуры – предположительно, диатремы газовых взрывов.

В работах монографического типа и справочниках, посвященных породам кремнистого состава: яшмам, фтанитам, радиоляритам, диатомитам, опокам и десяткам других, – особой формы кремнезема в виде гидротермального геля, проникающего из недр в толщу осадочных пород, не выделено [13, 14]. Только в лаконичном справочнике по качеству кремня как промышленного минерального сырья [15] описаны все его формы: желваки, линзы, окремненные участки известняков, микроскопические включения, жеоды, секреты, прожилки. Далее дан обзор взглядов ученых на генезис кремней: сингенетичные осадочные породы, диагенетичные или эпигенетичные образования. Большинство отечественных специалистов склонялись вслед за зарубежными [16] к версии осаждения кремня из нисходящих растворов. Однако есть ссылка на работу [17], где утверждается, что хорошая сохранность биоты в кремнях есть признак их сингенетичного образования в толще осадочных пород с органикой. Подтверждение этому предположению мы намерены высказать всем текстом статьи и привести в выводах.

Методы исследований

Ранее, в 2015 г., при инженерно-геологических изыскательских работах для застройки территории на западной окраине пос. Приданниково были проведены электроразведочные работы, установившие контакт толщи мергелей с известняками рифовой постройки. Удельное электрическое сопротивление мергелей не превышало 150–200 Ом·м. Среди известняков рифовой постройки на местности, выглядевшей как возвышенности с превышениями 50–100 м, установлено наличие разностей со значениями в сотни Ом·м, но и с повышенными (до 1500–2500 Ом·м). В обнажениях на карьерах балластного дорожного камня

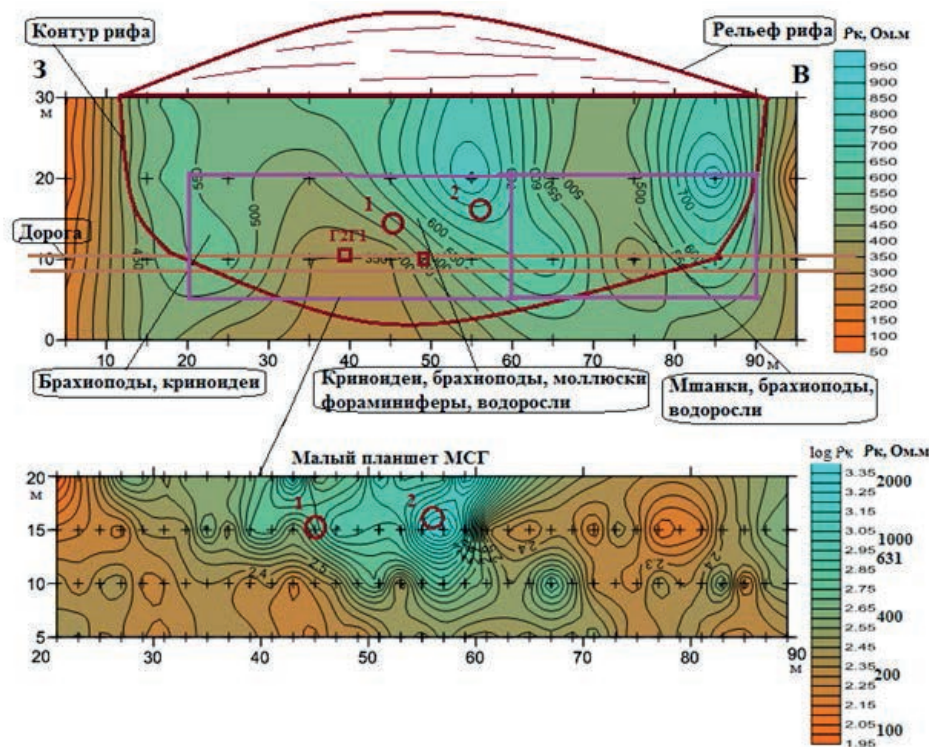


Рисунок 2. Планы изоом на большом и малом планшетах МСГ на южной выклинке рифовой постройки к западу от Приданниково. Указаны контуры рифа, видовой состав фауны в нем, места отбора образцов известняков и кремней (цифры 1 и 2), из которых сделаны шлифы для минераграфического исследования
Figure 2. Plans of isosomes on the large and small MSG tablets on the southern outcrop of the reef structure west of Pridan-nikovo. The contours of the reef, the species composition of the fauna in it, the places where samples of limestone and flint were taken (numbers 1 and 2), from which thin sections for mineralogical research were made, are indicated

было видно, что высокоомные известняки постройки существенно окремнены (жесткие, более плотные).

После проведения методических научно-исследовательских работ 2022 г. со студентом Я. А. Беленко в группу были привлечены минераграф А. А. Мазухина и палеонтолог Е. Ю. Лобанов [18]. В итоге установлена гидротермальная природа инъекций кремней в рифовые известняки постройки вблизи пос. Приданниково, а также в образцах из западной части постройки Шахтау вблизи г. Стерлитамак Башкортостана. Материалы представлены на научной конференции в Пермском национальном исследовательском институте в мае 2022 г. [13]. Всего геофизических исследований на участке Приданниково нами выполнено: 5 планшетов МСГ, 7 точек вертикального электрического зондирования, 3 погонных километра электроразведки методом дипольного профилирования через рифы и толщу мергелей. Палеонтологическое картирование рифовой постройки, вскрытой старым карьером балластного камня, обнажений песчаников в дорожной выемке на трассе Екатеринбург–Пермь выполнил Е. Ю. Лобанов. Минераграфическое исследование шлифов и аншлифов известняков и кремней с фауной провела А. А. Мазухина.

Результаты исследований

При проведении площадных электроразведочных работ методом срединного градиента (МСГ) на южной выклинке рифовой постройки установлено изменение значений кажущегося удельного электрического сопро-

тивления ($УЭС, \rho_k$) известняков на глубине около 25–30 м в диапазоне 400–950 Ом · м. На детализационных малых планшетах МСГ значения кажущегося УЭС известняков на глубине примерно 10–15 м изменяются в диапазоне 200–2000 Ом · м (рис. 2). На большом планшете в пределах рифовой постройки выделяются три субмеридиональные полосы повышения ρ_k до значений 500–900 Ом · м. На малом планшете МСГ восточная из полос не проявляется, а в западной и центральной частях рифа выделяются участки повышения ρ_k до 1000–2000 Ом · м. Такое изменчивое положение высокоомных зон может свидетельствовать о сложной форме участков выхода кремней из недр на поверхность во время роста рифа или внедрения в его внутреннюю часть.

Палеонтологическое картирование Приданниковского рифа, вскрытого карьером по добыче балластного камня, позволило выделить разнообразие фауны, формирующей его, зональность строения рифа, обусловленную его положением относительно близкой береговой линии к востоку от него и морской акватории к западу (рис. 3). В восточной части в условиях прибрежной спокойной лагуны на рифе выросли крупные криноидеи, в западной волноприбойной зоне они мелкие, здесь встречаются обломки фауны мшанок, брахиопод. В центральной части рифа существовало самое большое сообщество рифовой фауны. В обнажении видны отдельные желваки серых кремней размером 5–15 см, две линзы размером 0,3–1,5 м. В кремнях из линзы фауны почти нет – лишь отдельные ружозы, членики

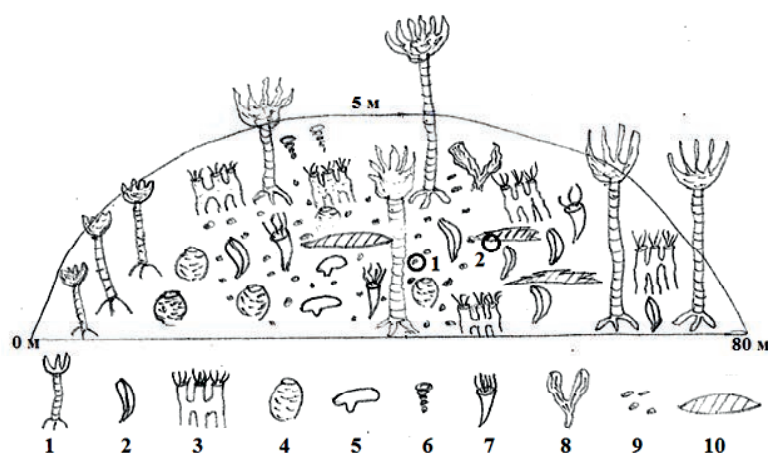


Рисунок 3. Схематическое изображение ширины и высоты рифовой постройки к востоку от Приданиково и состав фауны: 1 – криноидеи; 2 – брахиоподы; 3 – мшанки; 4 – губки; 5 – двустворки; 6 – гастроподы; 7 – одиночные ругозы; 8 – ветвистые кораллы; 9 – фораминиферы; 10 – линзы кремней. Кружки с цифрами 1, 2 – места отбора образцов, из образца 2 изготовлен шлиф, приведенный на рис. 7, а

Figure 3. Schematic representation of the width and height of the reef structure east of Pridannikovo and the composition of the fauna: 1 – crinoids; 2 – brachiopods; 3 – bryozoans; 4 – sponges; 5 – bivalves; 6 – gastropods; 7 – single rugosa; 8 – branched corals; 9 – foraminifera; 10 – lenses of flints. Circles with numbers 1, 2 are sampling sites; the thin section shown made from sample 2 is shown in fig. 7, a



Рисунок 4. Обнажение Афанасьевское в северной стенке дорожной выемки трасы Р 242 на 212 км: К – выход гидротермальных кремней в толщу песчаников; М – прослой мергелей; ОП – слоистые существенно окремненные песчаники

Figure 4. Afanasievskoye outcrop in the northern wall of the road cut on the P 242 route at km 212: K – exposure of hydrothermal cherts into the sandstone strata; M – marl layer; ОП – layered significantly silicified sandstones

криноидей, упавшие, вероятно, в горячий гель кремня при его внедрении в риф, при выходе его на поверхность рифа.

Северное продолжение рифа, тоже вскрытое карьером на удалении в 50–100 м, представлено почти полностью субгоризонтальными слоями кремней – от серых до темных, большей частью серых плотных, с обилием фауны отличной сохранности (фузулиниды, спикулы губок, мелкие брахиоподы, редкие ругозы, мелкие, до 1 мм, гастроподы, членики криноидей, тоже до 1 мм в диаметре, мелкие, до 2 мм, аммоноидеи). Кремневая масса внедрилась в известковые отложения: их присутствие доказывается реакцией на соляную кислоту. Вопрос о заселении рифовой фауной кремней рассмотрим далее, при описании участка Подгорная.

Участок обнажения толщи конгломератов и песчаников прибрежных фаций отложений артинского яруса [5, 7, 8] Афанасьевский дает возможность наблюдать внедрение и растекание гидротерм кремнекислоты в толщу песчаников и прослой мергеля (рис. 4). Гидротермы формируют в песчаниках структуры, подобные лакколлитам или батолитам, почти полностью представленные кремнями. Справа от фигуры человека на снимке можно видеть, что кремни полностью заменили собой прослой мергеля на участке восхождения гидротерм. Окремненные субгоризонтальные слои песчаников вблизи подводящего канала имеют мощность около 3 м, к западу и востоку уходят на 80–100 м, с постепенным снижением мощности окремнения до 1–0,5 м. Возможно, здесь про-

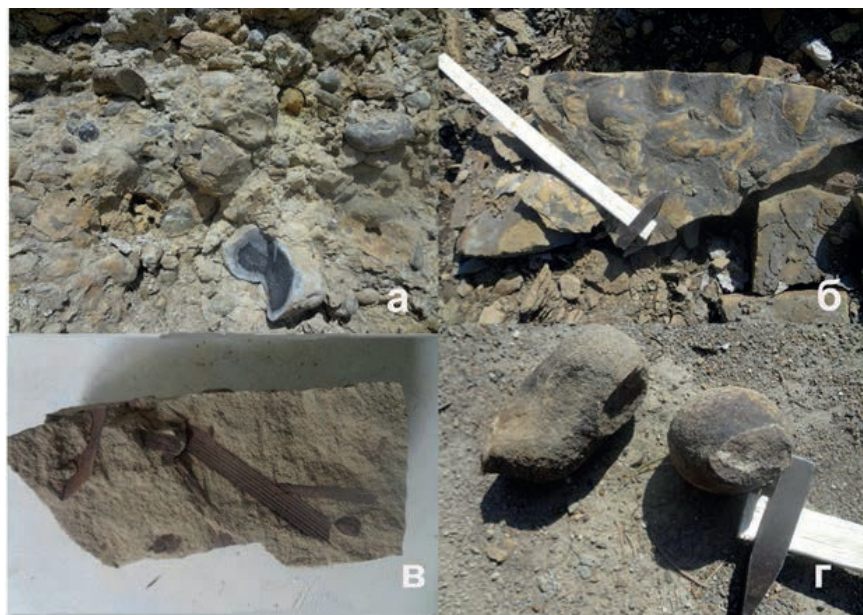


Рисунок 5. Литология обнажения Афанасьевское: а – линзы кремней с обильной фауной в отложениях прибрежных песчаников; б – знаки ряби на поверхности песчаников; в – отпечатки растений на них же; з – кремневые образования с четко видимыми очертаниями подводных каналов (в нижней части), по которым происходило их выдавливание на поверхность или в массив песчаников
Figure 5. Lithology of the Afanasyevskoye outcrop: a – lenses of cherts with abundant fauna in coastal sandstone deposits; б – ripple marks on the surface of sandstones; в – imprints of plants on them; з – flint formations with clearly visible outlines of supply channels (in the lower part), through which they were extruded onto the surface or into the sandstone massif

исходило субгоризонтальное растекание кремнекислоты во время осаждения песчаников.

Песчаники мелкозернистые и пылеватые, полимиктовые, с карбонатным цементом. При инъеции в них кремнекислоты цвет их из серого становится темно-серым. Карбонатный цемент замещается не полностью. Часто в слоях песчаников наблюдаются шарообразные конкреции, выполненные окремненным песчаником, размер их от первых сантиметров (рис. 5, з) до 0,5 м. Во внешней зоне конкреции в песчаниках есть кольца Лизеганга серого и светло-коричневого цвета. Кольца Лизеганга как раз и указывают на диффузию кремнекислоты в песчаники [19]. Здесь же в песчаниках отмечаются знаки прибойной ряби, отпечатки растений, желваки кремней (рис. 5).

Участок Подгорная в региональном представлении В. Д. Наливкина располагается в западной части полосы песчаников артинского яруса, но реально он сложен толщей галечника мощностью до 3 м. Гальки и валуны представлены желваками и конкрециями кремней, галькой из органогенных известняков. Эти прибрежные фации отложений вскрыты карьерами балластного камня за северо-западной окраиной д. Подгорная, расположенной в 1–2 км от пос. Александровский и двух сопкок-рифов, имеющих статус памятников природы и оригинальные названия: Остренькая и Титечная [1, 3, 8]. Среди галек и конкреций кремней можно наблюдать свидетельства различной степени освоения представителями рифовой и морской фауны кремневых гидротерм (рис. 6).

В конкрециях голубых фарфоровидных кремней наблюдается многочисленная фауна идеальной сохранности: спикулы губок, фораминиферы, в одной из конкреций отмечена одиночная ругоза диаметром около 1 см, а также одиночный хвостовой отпечаток трилоби-

та (около 2 мм), один экземпляр брахиоподы (диаметр около 1 см).

Кремни с многочисленными переплетенными колониями тециид (рис. 6, з). Часть колоний погибала от внедрявшихся поверх них кремневых масс, оставшиеся в живых зооиды надстраивали колонию, часть колоний нарастала друг на друга.

Кремни с мелкими довольно редкими одиночными ругозами, стеблями криноидей и многочисленными фораминиферами (колониальные организмы полностью отсутствуют); рис. 6, в показывает, что кремневая масса внедрялась в пески: по краю образца видны гальки.

Кремни с концентрической зональностью, мелкими брахиоподами и фораминиферами; другая фауна, в том числе колониальная, отсутствует (рис. 6, а). По-видимому, кремневая масса выдавливалась, потом застывала (верхняя часть), после чего выдавливалась следующая порция и тоже застывала.

На рис. 6, б виден процесс выдавливания кремневой массы: на выдавленную массу падали простейшие (фораминиферы), частично селились колонии, потом снова происходило выдавливание, на отложившуюся массу опять опускались простейшие.

Поскольку кремневая масса была горячей и довольно плотной, то для колонии риск быть полностью занесенной рыхлыми осадками, обычный в илистых отложениях, был минимальным, и фауна «освоила» кремни. Один из авторов статьи находил конодонты хорошей сохранности в голубых прозрачных кремнях на Полярном Урале (р. Средняя Лагорта), что подтверждает возможность жизни фауны в кремневой массе. Расположение рифовых построек среди карбонатно-глинистых отложений (мергелей) Юрюзано-Сылвенской депрессии [20], воз-

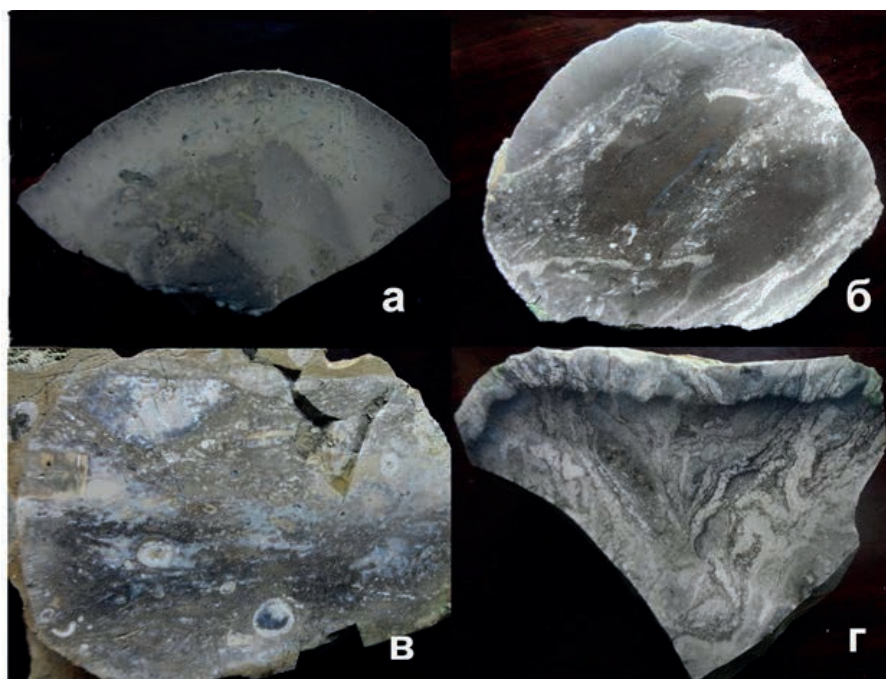


Рисунок 6. Участок Подгорная: а – кремневая конкреция с четко выраженной зональностью и малочисленной фауной (фузулиниды и редкие мелкие брахиоподы); б – три цикла выдавливания кремневой массы на поверхность, каждый из которых «перекрывался» фузулинидами и редкими колониальными мшанками; в – кремневая линза в песчаниках с довольно многочисленной фауной (фузулиниды, редкие мелкие брахиоподы, членики криноидей и ругозы); г – кремневая линза с многочисленными колониальными тецидами, рост которых неоднократно прерывался как из-за поступления новых порций кремневых масс, так и из-за нарастания колоний друг на друга

Figure 6. Podgornaya site: а – flint nodule with clearly defined zonation and a small fauna (fusulinids and rare small brachiopods); б – three cycles of extrusion of the flint mass onto the surface, each of which was “overlaid” by fusulinids and rare colonial bryozoans; в – flint lens in sandstones with a fairly numerous fauna (fusulinids, rare small brachiopods, crinoid segments and rugosa); г – flint lens with numerous colonial theciids, the growth of which was repeatedly interrupted both due to the arrival of new portions of flint masses and due to the growth of colonies on top of each other

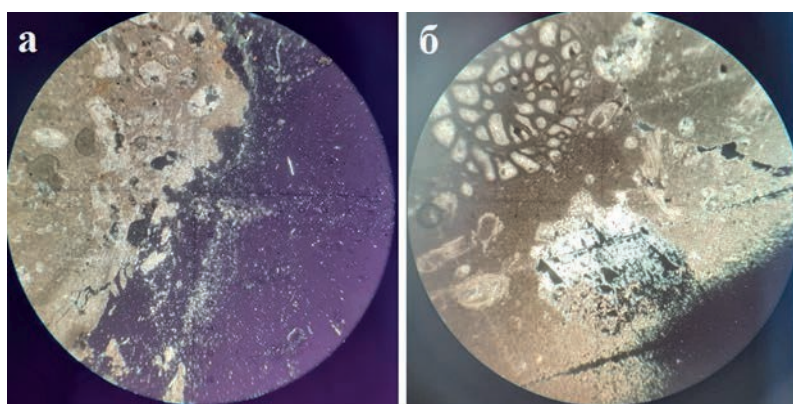


Рисунок 7. Фото шлифов (поле зрения 2,3 мм): а – контакт кремней (темное с белыми зернами кристаллизации кварца) с органогенными известняками постройки Приданниково; б – кристаллы кварца (белое) и кремнь (черное) в изометричном пространстве поры в органогенном известняке из западной части рифовой постройки Шахтау

Figure 7. Photo of thin sections (field of view 2.3 mm): а – contact of cherts (dark with white grains of quartz crystallization) with organogenic limestones of the Pridannikovo building; б – quartz crystals (white) and flint (black) in the isometric space of a pore in organogenic limestone from the western part of the Shakhtau reef structure

можно, и обусловлено наличием выходов здесь гидротерм кремния.

Нам гидротермальный генезис кремней представился очевидным уже при исследовании рифа вблизи пос. Приданниково. Студентка 4 курса УГГУ А. А. Мазухина, имеющая практику минералогических исследований на кафедре минералогии и в лабор

аториях Института геологии и геохимии УрО РАН, при просмотре шлифов окремненных известняков сразу же отметила не холодный, а термальный тип контакта кремней с органогенными известняками, увидела структуры кристаллизации кварца в кремнях [13]. Это указывает на температуру кремней, поступающих в риф, в первые сотни градусов, т. е. на гидротермальную

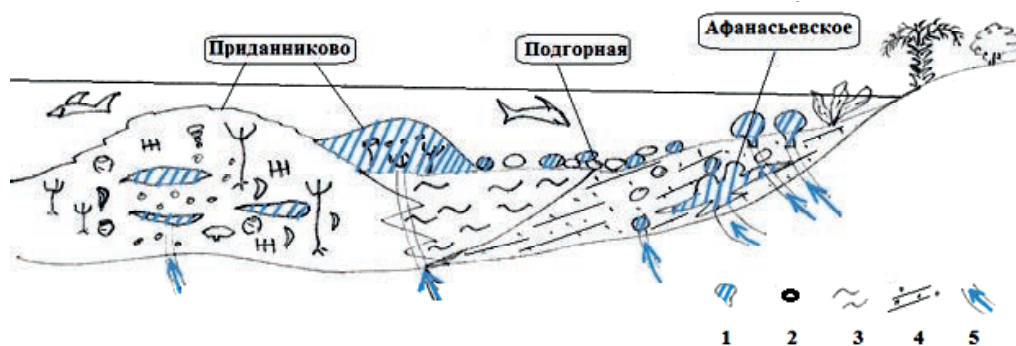


Рисунок 8. Схема расположения опорных разрезов в отложениях артинского яруса, фауны и флоры в них, участков внедрения гидротермальных кремней: 1 – кремни; 2 – галька, валуны; 3 – мергель; 4 – песчаники; 5 – предполагаемые каналы гидротерм кремневого состава

Figure 8. Scheme of the location of reference sections in the deposits of the Artinskian stage, fauna and flora in them, areas of introduction of hydrothermal cherts: 1 – cherts; 2 – pebbles, boulders; 3 – marl; 4 – sandstones; 5 – supposed hydrothermal channels of siliceous composition

в изначальном значении этого термина природу инъекций кремней (рис. 7).

Наблюдение окремнения в различных фациях отложений артинского яруса дает возможность построить схему внедрения гидротерм кремнекислоты по каналам из недр Предуральского прогиба (рис. 8). Источник кремнекислоты – недра Предуральского прогиба. В верхнем карбон-нижней перми на Урале, в 100–300 км восточнее, бурно проявлялись процессы орогенеза с формированием крупных гранитных батолитов. В прогибе в это время происходило опускание земной коры, которое не могло не сопровождаться выделением из недр горячих газов и гидротерм.

На наш взгляд, после установления гидротермальной природы кремней в Предуральском прогибе, систематизации известных сведений об ареале и времени окремнения отложений карбона и перми необходимо ввести понятие «верхнепалеозойский гидротермальный пояс западного склона Урала». Он начал формироваться в среднем карбоне, завершился в перми и протягивался практически по всему западному склону Среднего и Южного Предуралья – от Кунгура до Шахтау. В кунгурский век, с угасанием магматической активности, пояс прекращает свою деятельность, в вышележащих отложениях кремни уже не встречаются даже в остаточном виде.

Краткие выводы

1. Различие удельного электрического сопротивления литологических разностей органогенных известняков по-

зволяет при помощи электроразведки методами сопротивлений проводить исследование внутренней структуры рифовых построек, в частности, выделять участки окремнения.

2. Палеонтологическое картирование рифовой постройки вблизи пос. Приданниково установило формирование ее различных частей биотой лагунных, центральных возвышенных и волноприбойных сообществ.

3. Минераграфическими исследованиями образцов окремненных известняков доказана гидротермальная природа инъекций кремней в рифовые постройки.

4. Выходы гидротерм кремния в толщу мергелей могли быть определяющим условием для заложения и существования здесь рифовых органогенных построек.

5. Внедрение кремней установлено в песчаники и конгломераты прибрежных и морских отложений артинского яруса.

6. Сделано предположение о наличии гидротермального пояса протяженностью от Среднего (Кунгур) до Южного (Стерлитамак) Предуралья, с которым связано формирование артинских и, вероятно, более ранних, карбоновых, кремней.

7. Объединенному разрезу отложений артинского яруса Афанасьевское–Подгорная–Приданниково следует в Предуралье придать статус геологического памятника, в котором соединены прибрежные терригенные, прибрежные морские, предрифовые и рифовые фации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Маслов В. П. Геолого-литологическое исследование рифовых фаций Уфимского плато // Труды Института геологических наук АН СССР. Сер. геол. 1950. Вып. 118. № 42. 69 с.
2. Мизенс Г. А. Верхнепалеозойский флиш Западного Урала. Екатеринбург: УрО РАН, 1997. 230 с.
3. Путеводитель геологических экскурсий по карбону Урала / под ред. Б. И. Чувашова. Екатеринбург: Ин-т геологии и геохимии УрО РАН, 2002. 72 с.
4. Чувашов Б. И. Особенности тектонического развития территории западного склона Среднего Урала в позднем палеозое // Геология палеозоя и мезозоя Урала и Зауралья. Свердловск, 1975. С. 43–57.
5. Опорные разрезы верхнего карбона и нижней перми западного склона Урала и Приуралья / Б. И. Чувашов [и др.]. Свердловск: УрО АН СССР, 1990. 369 с.
6. Знаменитые месторождения Урала / Д. А. Клейменов [и др.]. Екатеринбург: Уральский рабочий, 2007. Ч. II. 240 с.
7. Наливкин В. Д. Стратиграфия и тектоника Уфимского плато и Юрюзано-Сылвенской депрессии // Труды ВНИГРИ. М.; Л., 1949. Вып. 46. 206 с.
8. Наливкин В. Д. Фации и геологическая история Уфимского плато и Юрюзано-Сылвенской депрессии // Труды ВНИГРИ. М.; Л., 1950. Вып. 47. 127 с.

9. Горский И. И. Кораллы среднего карбона западного склона Урала. М.: Наука, 1978. 224 с.
10. Степанова Т. И. Комплекс фораменифер каменскоуральского горизонта верхнего визе в разрезе «Худолаз» // Ежегодник-2009: труды ИГГ УрО РАН. 2010. Вып. 157. С. 44–49.
11. Михайлова Е. Д., Тарасенко А. Б., Рахмонов У. Ж., Ерина М. В., Ремизова С. Т. Строение и условия образования пограничных отложений силура и девона на западе Зеравшано-Гиссарской горной области (Разрез Оби-Сафит, Китабский государственный геологический заповедник, Узбекистан) // Литосфера. 2017. № 17(6). С. 40–61. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2017-6-040-061>
12. Кисин А. Ю., Коротеев В. А. Блоковая складчатость и рудогенез. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2017. 349 с.
13. Кузин А. В., Беленко Я. А., Мазухина А. А., Лобанов Е. Ю. Геолого-геофизические исследования рифовых известняков Предуральского прогиба // Геология и полезные ископаемые Западного Урала: сборник науч. статей / под ред. П. А. Красильникова. Пермь: ПГНИУ, 2022. Вып. 5(42). С. 209–214. <https://elibrary.ru/acnrqg>
14. Кремнистые породы СССР (диатомиты, опоки, трепелы, спанголиты, радиоляриты). Казань: Татарское кн. изд-во, 1976. 412 с.
15. Требования промышленности к качеству минерального сырья: справочник для геологов. Вып. 18. Кремень. М.: ГНТИ, 1963. 20 с.
16. Green A. T., Stewart G. N. Ceramics: a symposium. U. K., Stoke-on-Trent: British Ceramic Society, 1953. 877 p.
17. Rutten M. Remarks on the genesis of flints // American Journal of Science. 1957. Vol. 255. No. 6. P. 432–439.
18. Богоявленская О. В., Лобанов Е. Ю. Рифогенные сообщества раннего и среднего палеозоя Уральского палеобассейна // Биостратиграфия среднего-верхнего палеозоя Русской платформы и складчатых областей Урала и Тянь-Шаня: сборник науч. трудов. М., 1995. С. 164–170.
19. Кузнецов В. Г. Эволюция осадочного породообразования в истории Земли. М.: Научный мир, 2016. 211 с.
20. Геология «Предуралья»: геология, геохимия и геофизика учебно-научной базы «Предуралье» / Г. Ю. Пономарева [и др.]; отв. ред. Г. Ю. Пономарева, И. Ю. Герасимова, И. С. Хопта. Пермь: ПГНИУ, 2017. 216 с.

Статья поступила в редакцию 13 сентября 2023 года

On the hydrothermal nature of cherts in the Artinskian stage deposits of the Cis-Urals

Aleksey Vasil'evich KUZIN*
Evgeniy Yur'evich LOBANOV**

Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia

Abstract

Relevance. The results of paleontological, geophysical, and mineragraphic studies of flints in Artinskian stage deposits in the Cis-Urals are presented.

Purpose of the work. Reef organogenic structures with silicified limestones and flints, silicified sandstones and injections of flints into them have been studied. The goal is to show the hydrothermal nature of chert injections into reefs and sandstones.

Research methods. Geophysical electrical prospecting studies of reef limestones with the aim of identifying areas of silicification, geological and paleontological mapping of reefs, biostromes, bioherms, sandstones, areas of accumulation of nodules and flint nodules, study of polished sections of silicified rocks, production of thin sections and their mineragraphic study.

Results of the work. Paleontological mapping of the reef structure made it possible to establish the different species composition, size, and preservation of biota in the coastal, summit and outer parts of the reef. Mineragraphic studies have established the high-temperature hydrothermal nature of chert in all types of sediments. Hydrothermal injections of chert into sandstone layers occur by diffusion with the formation of siliceous nodules and Lysigang rings in sandstones. Intensive penetration of silicon hydrotherms into sandstone layers forms areas of silicification in them in the form of laccoliths tens of meters in size. Various degrees of development of flint hydrotherms by marine fauna have been established. Flints may include small specimens of small fauna, be rich in well-preserved fauna, or include layers of biota overlain by layers of flints covered with new colonies of microorganisms. Sometimes cherts contain only fragments of faunal shells caught in the hot gel of cherts.

Conclusions. Hydrotherms of siliceous composition in loose marine sediments could be a condition for the development of biota and the basis for reef structures. Increased values of electrical resistivity of flints and silicified limestones allow electrical prospecting to explore the internal structure of reefs. It has been suggested that in the Carboniferous and Early Permian in the Cis-Urals there was a hydrothermal belt extending from Kungur to Sterlitamak.

Keywords: cherts, silicified sandstones, sedimentation, hydrotherms, paleontology, mineragraphy, electrical prospecting.

REFERENCES

1. Maslov V. P. 1950, Geological and lithological study of reef facies of the Ufa plateau. *Trudy Instituta geologicheskikh nauk Akademii Nauk SSSR* [Proceedings of the Institute of Geological Sciences of the USSR Academy of Sciences], issue 118, no. 42, 69 p. (In Russ.)
2. Misens G. A. 1997, Upper Paleozoic flysch of the Western Urals. Ekaterinburg, 230 p. (In Russ.)
3. Chuvashov B. I. 2002, Guide to geological excursions through the carbon fiber of the Urals. Ekaterinburg, 72 p. (In Russ.)
4. Chuvashov B. I. 1975, Features of tectonic development of the territory of the western slope of the Middle Urals in the late Paleozoic. *Geology of the Paleozoic and Mesozoic Urals and Trans-Urals*. Sverdlovsk, pp. 43–57. (In Russ.)
5. Chuvashov B. I. [et al.]. 1990, Reference sections of the Upper Carboniferous and Lower Permian of the western slope of the Urals. Sverdlovsk, 369 p. (In Russ.)
6. Kleimenov D. A. [et al.]. 2007, Famous deposits of the Urals. Ekaterinburg, 240 p. (In Russ.)
7. Nalivkin V. D. 1949, Stratigraphy and tectonics of the Ufa Plateau and the Yuryuzan-Sylyven depression. *Trudy Vsesoyuznogo neftyanogo nauchno-issledovatel'skogo geologorazvedochnogo instituta* [Proceedings of the All-Union Petroleum Research Geological Prospecting Institute], Moscow, Leningrad, issue 46, 206 p. (In Russ.)
8. Nalivkin V. D. 1950, Facies and geological history of the Ufa Plateau and the Yuryuzan-Sylyven depression. *Trudy Vsesoyuznogo neftyanogo nauchno-issledovatel'skogo geologorazvedochnogo instituta* [Proceedings of the All-Union Petroleum Research Geological Prospecting Institute], Moscow, Leningrad, issue 47, 127 p. (In Russ.)
9. Gorsky I. I. 1978, Corals of the Middle Carboniferous of the western slope of the Urals. Moscow, 224 p. (In Russ.)
10. Stepanova T. I. 2010, Foraminiferal complex of the Kamensk-Ural horizon of the Upper Viséan in the Khudolaz section. *Yearbook 2009: Proceedings of the Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences*, issue 157, pp. 44–49. (In Russ.)
11. Mikhailova E. D., Tarasenko A. B., Rakhmonov U. Zh., Erina M. V., Remizova S. T. 2017, Structure and conditions of formation of boundary deposits of the Silurian and Devonian in the west of the Zeravshan-Gissar mountain region (Obi-Safit section, Kitab State Geological Reserve, Uzbekistan). *Litosfera* [Lithosphere], no. 17 (6), pp. 40–61. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2017-6-040-061>
12. Kisin A. Yu., Koroteev V. A. 2017, Block folding and ore genesis. Ekaterinburg, 349 p. (In Russ.)

*kuzin-av@mail.ru

**aziat1966@mail.ru

13. Kuzin A. V., Belenko Ya. A., Mazukhina A. A., Lobanov E. Yu. 2022, Geological and geophysical studies of reef limestones of the Cis-Ural trough. *Geologiya i poleznyye iskopayemyye Zapadnogo Urala* [Geology and minerals of the Western Urals], issue 5 (42), pp. 209–214. (In Russ.) <https://elibrary.ru/acnrqg>
14. 1976, Siliceous rocks of the USSR (diatomites, opoka, tripoli, spangolites, radiolarites). Kazan, 412 p. (In Russ.)
15. 1963, Industry requirements for the quality of mineral raw materials: a guide for geologists, vol. 18. Moscow, 20 p. (In Russ.)
16. Green A. T., Stewart G. N. 1953, *Ceramics: a symposium*. U. K., Stoke-on-Trent: British Ceramic Society, 877 p.
17. Rutten M. 1957, Remarks on the genesis of flints. *American Journal of Science*, vol. 255, no. 6, pp. 432–439.
18. Bogoyavlenskaya O. V., Lobanov E. Yu. 1995, Reefogenic communities of the early and middle Paleozoic of the Ural paleobasin. Biostratigraphy of the Middle-Upper Paleozoic of the Russian Platform and folded regions of the Urals and Tien Shan. Moscow, pp. 164–170. (In Russ.)
19. Kuznetsov V. G. 2016, Evolution of sedimentary rock formation in the history of the Earth. Moscow, 211 p. (In Russ.)
20. Ponomareva G. Yu. [et al.]. 2017, Geology of the Cis-Urals: geology, geochemistry and geophysics of the educational and scientific base Cis-Urals. Perm, 216 p. (In Russ.)

The article was received on September 13, 2023

Воздействие предприятий горно-металлургического комплекса Свердловской области на окружающую среду и направления его снижения

Ирина Владимировна МЕДВЕДЕВА^{1,2*}
Елизавета Владиславовна АМИРОВА¹
Геннадий Андреевич СТУДЕНОК^{1***}
Евгений Михайлович ЦЕЙТЛИН^{1****}
Ольга Михайловна МЕДВЕДЕВА³

¹Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия

²Институт физики металлов им. М. Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия

³Уральский государственный медицинский университет, Екатеринбург, Россия

Аннотация

Цель работы. Многолетняя интенсивная деятельность предприятий горно-металлургического комплекса Свердловской области, обусловленная наличием значительного количества месторождений рудных полезных ископаемых, неизбежно приводит к серьезному негативному воздействию на окружающую среду. Целью настоящей работы является анализ этого воздействия за последние годы, мер, принимаемых крупнейшими предприятиями комплекса для его снижения, и оценка направлений и возможностей дальнейшей работы в данном направлении.

Методология работы. В работе для анализа и систематизации использовались данные из открытых источников – государственных докладов о состоянии окружающей среды на территории Свердловской области за период 2017–2022 гг., научных докладов, данные официальной статистики.

Результаты работы и область их применения. Проанализированы и систематизированы данные по воздействию наиболее крупных предприятий горно-металлургического комплекса Свердловской области на окружающую среду: АО «ЕВРАЗ Качканарский горно-обогатительный комбинат», ОАО «Высокогорский горно-обогатительный комбинат», АО «ЕВРАЗ Нижнетагильский металлургический комбинат», АО «Объединенная компания РУСАЛ Уральский алюминий» и др. Описаны возможности снижения данного негативного воздействия и требуемые, по мнению авторов, направления действий: 1) разработка и реализация комплексного территориального эко-технологического подхода, включающего в себя проработку разнообразных и разнокачественных природно-технологических, экономических, управленческих и социальных аспектов; 2) внедрение природосберегающих технологий; 3) прогноз состояния окружающей среды и использование данных прогнозирования при реализации производственной деятельности.

Выводы. Большинство крупных предприятий отрасли показывает тенденцию к улучшению экологических показателей, осуществляя ряд мероприятий по охране окружающей среды. При этом следует отметить, что одним из факторов, во многом определяющих степень воздействия на окружающую среду, по-прежнему остается количество производимой продукции. Реализация сложных и масштабных задач, связанных со снижением нагрузки на окружающую среду вследствие экологизации производства со стороны предприятий горно-металлургического комплекса, требует внедрения серьезных научно-практических разработок с соответствующей финансовой поддержкой и проведения последовательной государственной политики.

Ключевые слова: горно-металлургический комплекс, загрязнение окружающей среды, охрана окружающей среды, комплексный подход, объекты накопленного вреда окружающей среде, прогноз качества окружающей среды.

Введение

Свердловская область относится к числу старейших и самых крупных горнодобывающих регионов России по величине разведанных и прогнозируемых запасов полезных ископаемых. На территории Свердловской области имеется 26 месторождений железной руды, 9 месторожде-

ний марганцевой руды, 6 месторождений хромовых руд, 25 месторождений бокситов, 28 месторождений медной руды, 6 месторождений никелевой руды, 12 месторождений цинка и 5 месторождений ванадия [1]. Такое разнообразие и объемы залежей руд определили интенсивное

✉ief.ie@m.ursmu.ru

**Gennadiy.Studenok@m.ursmu.ru

***tseitlin.e.m@gmail.com

развитие горнодобывающей промышленности, а также черной и цветной металлургии.

Предприятия горно-металлургического комплекса Свердловской области занимают значительную долю в общем объеме российского производства металлопродукции. Основной специализацией предприятий черной металлургии региона является выпуск «транспортного» металла (рельсы, колеса), а также сортового и листового проката и труб. Производство сортового металла обеспечивает получение практически всего классического сортамента – от крупных балок до мелкосортного проката, проволоки и простых профилей, в том числе из специальных сталей. Трубные предприятия области являются одними из самых крупных в стране и осуществляют выпуск труб среднего и малого диаметра, цельных горячекатаных, холоднодеформированных, в том числе из коррозионно-стойких сталей. Основными российскими потребителями труб остаются нефтегазовый, машиностроительный и энергетический секторы российской экономики. До 20 % труб, производимых на трубных заводах Свердловской области, поставляется на экспорт.

Предприятия цветной металлургии Свердловской области осуществляют выпуск алюминиевой, медной, титановой продукции, а также продукции спецметаллургии. Ведущим предприятием по производству сплавов на основе титана и их последующей обработке в Российской Федерации является ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА». Предприятие производит продукцию из титановых сплавов – листы, прутки, поковки, штамповки, в том числе механически обработанные. Спецметаллургия Свердловской области включает в себя производство порошков на основе карбида вольфрама и спекание из них твердосплавных изделий, производство изделий из драгоценных и редких металлов для нужд нефтехимической промышленности и ряда высокотехнологичных отраслей, производство лигатур на базе редких металлов для предприятий черной и цветной металлургии.

Значительные объемы и разнообразие продукции предприятий горно-металлургического комплекса Свердловской области определяют и значительное воздействие на окружающую среду, стартовавшее еще три века назад, проявляющееся по трем основным направлениям: выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух, сбросы загрязняющих веществ в водные объекты и образование отходов, загрязняющие вещества из которых выносятся в окружающую среду воздушными и водными потоками. Загрязнению вследствие оседания загрязняющих веществ из атмосферы и размещения отходов неизбежно подвергаются и почвы. Вопросы оценки воздействия на окружающую среду предприятиями комплекса и его снижения стали предметом исследования значительного числа отечественных и зарубежных авторов. Упомянем лишь некоторых [2–10].

Результаты и их применение

Крупнейшими предприятиями горно-металлургического комплекса Свердловской области являются: АО «ЕВРАЗ Качканарский горно-обогатительный комбинат» (добыча и обогащение железной руды), ОАО «Высокогорский горно-обогатительный комбинат» (добыча и обогащение железной руды), АО «ЕВРАЗ Нижнета-

гильский металлургический комбинат» (черная металлургия), АО «Святогор» (добыча и обогащение руд цветных и черных металлов, производство черновой меди, цинкового и железного концентрата), ПАО «Надеждинский металлургический завод» (черная металлургия), АО «Объединенная компания РУСАЛ Уральский алюминий» (производство алюминия), ОАО «Каменск-Уральский металлургический завод» (производство алюминия), АО «Уралэлектромедь» (производство меди), АО «Среднеуральский медеплавильный завод» (производство меди), ПАО «Корпорация «ВСМПО-АВИСМА» (производство титана), АО «Кировградский завод твердых сплавов» (производство твердосплавных изделий), АО «Екатеринбургский завод по обработке цветных металлов» (производство изделий из цветных металлов), АО «Уралредмет» (лигатура на базе редких металлов). Металлургическое производство имеется также на предприятиях АО «Первоуральский новотрубный завод» (производство труб), ОАО «Уралтрубпром» (производство труб) [11]. Только за январь–июнь 2023 г. в Свердловской области было выплавлено 2204,1 тыс. т нелегированной стали; 2324,9 тыс. т легированной стали, произведено готового проката 2433,3 тыс. т [12].

Технологические процессы добычи, обогащения и выплавки из руд разнообразных по составу и свойствам сплавов сопровождаются образованием значительных объемов газообразных, жидких и твердых загрязнителей, которые поступают в природные среды – атмосферный воздух, поверхностные водные объекты, подземные воды и размещаются на свободных территориях. Вклад черной и цветной металлургии в загрязнение окружающей среды в РФ составляет 37 % от всех отраслей промышленности [13]. На территории Свердловской области в 2022 г. выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух только от металлургических производств составили 186,1 тыс. т, объем сточных вод, сброшенных в водные объекты крупнейшими металлургическими предприятиями, составил 75,44 млн м³, образовано 11 899,3 тыс. т отходов производства (из которых 55,9 % утилизировано и обезврежено) [1].

В табл. 1 и на рис. 1 приведена динамика выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух от крупных предприятий горно-металлургического комплекса Свердловской области в 2017–2022 гг. по данным [1, 14].

Анализ приведенной в табл. 1 и на рис. 1 динамики выбросов загрязняющих веществ показывает, что наиболее крупным загрязнителем атмосферного воздуха (АО «ЕВРАЗ Качканарский горно-обогатительный комбинат», ОАО «Высокогорский горно-обогатительный комбинат», АО «ЕВРАЗ Нижнетагильский металлургический комбинат», ПАО «Надеждинский металлургический завод», АО «Уралэлектромедь» и АО «Святогор») в рассмотренный период времени в основном удавалось в целом постепенно снижать выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух. Основными мероприятиями, приведшими к снижению объемов поступления загрязняющих веществ в атмосферный воздух, по данным [1, 14], стали ремонт пылегазоочистного оборудования (АО «ЕВРАЗ Качканарский горно-обогатительный комбинат», ОАО «Высокогорский горно-обогатительный

Таблица 1. Динамика выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух от крупных предприятий горно-металлургического комплекса Свердловской области в 2017–2022 гг., тыс. т/год [1, 14]

Table 1. Dynamics of emissions of pollutants into the atmospheric air from large enterprises of the mining and metallurgical complex of the Sverdlovsk region in 2017–2022, thousand tons/year [1, 14]

Предприятие	2017 г.	2018 г.	2019 г.	2020 г.	2021 г.	2022 г.
АО «ЕВРАЗ Качканарский горно-обогатительный комбинат»	86,1	85,6	80,8	81,1	78,3	79,0
АО «ЕВРАЗ Нижнетагильский металлургический комбинат»	72,7	65,0	65,0	64,3	66,0	66,7
ОАО «Высокогорский горно-обогатительный комбинат»	50,1	42,6	37,9	40,7	40,6	39,4
ПАО «Надеждинский металлургический завод»	36,0	35,8	34,7	35,1	31,2	34,9
АО «Уралэлектромедь»	27,1	25,6	26,6	26,5	26,8	26,9
АО «Святогор»	24,1	23,1	24,0	23,3	23,7	23,0
АО «Объединенная компания РУСАЛ Уральский алюминий»	5,3	5,1	4,2	4,4	7,2	3,9
АО «Среднеуральский медеплавильный завод»	3,4	3,5	3,6	3,8	4,1	4,1
ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА»	1,1	1,6	1,5	1,4	1,4	1,5

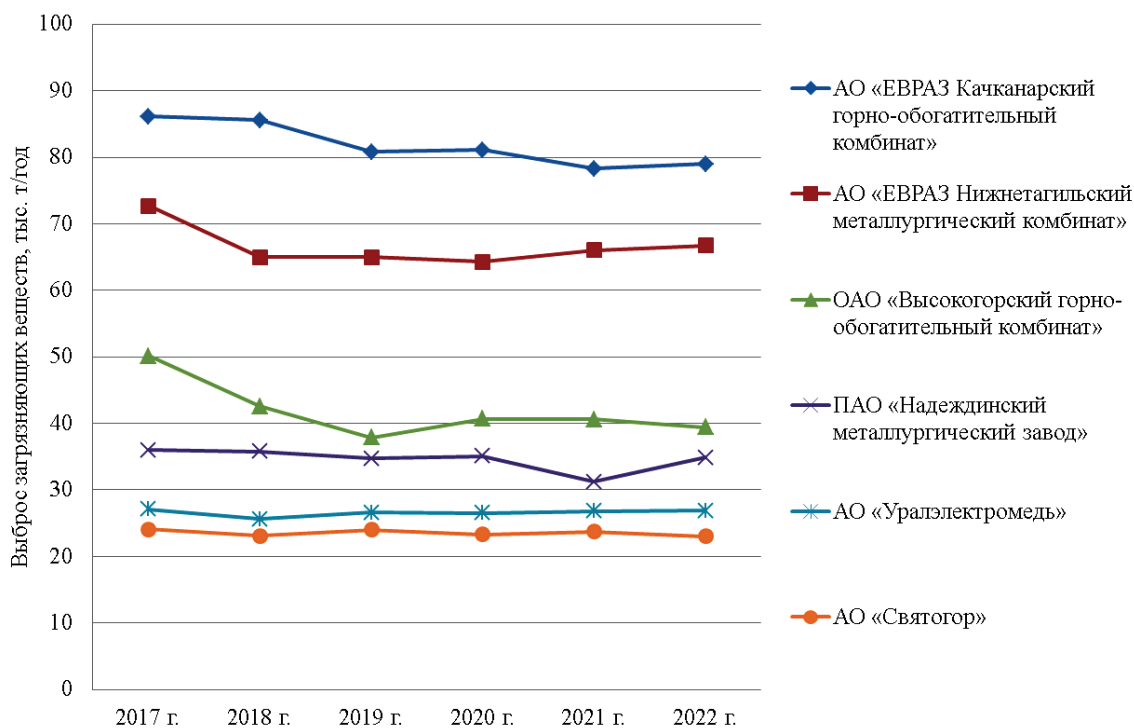


Рисунок 1. Динамика выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух от крупных предприятий горно-металлургического комплекса Свердловской области в 2017–2022 гг., тыс. т/год

Figure 1. Dynamics of emissions of pollutants into the atmospheric air from large enterprises of the mining and metallurgical complex of the Sverdlovsk region in 2017–2022, thousand tons/year

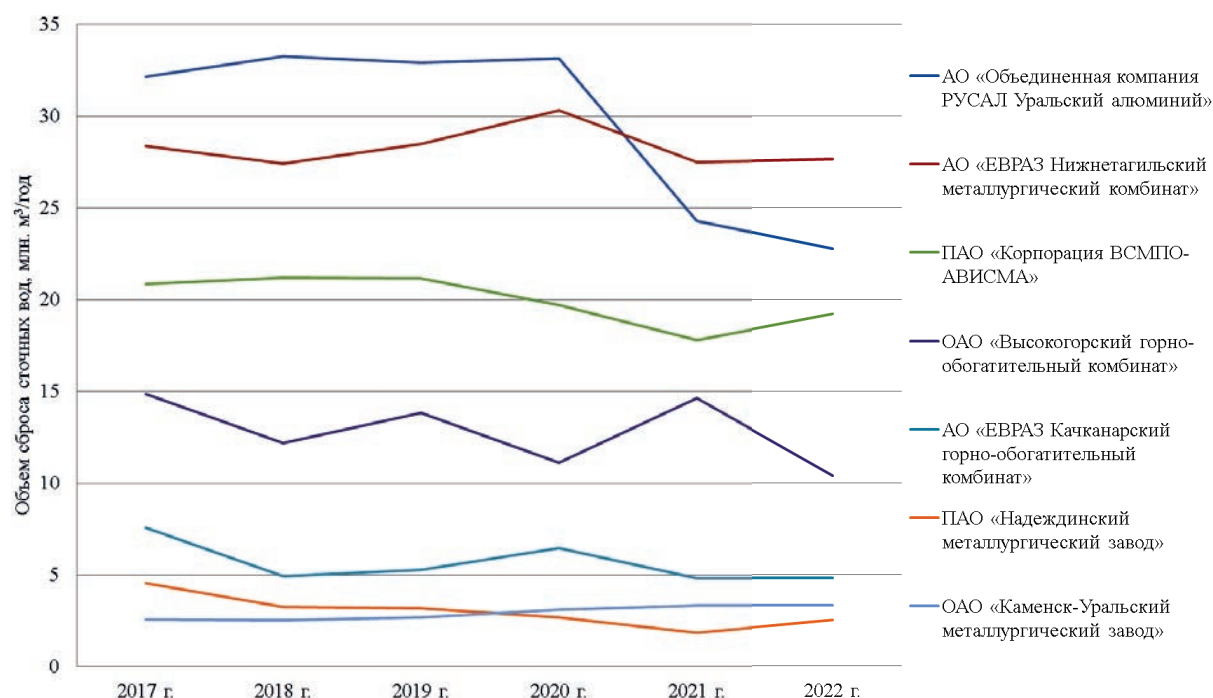
комбинат», АО «ЕВРАЗ Нижнетагильский металлургический комбинат»), а также корректировка технологических процессов, приведшая к уменьшению объемов выбросов: снижение содержания серы в топливе (ПАО «Надеждинский металлургический завод»), реконструкция участка дробления (ОАО «Высокогорский горно-обогатительный комбинат») и применение мокрого пылеподавления при ведении горных работ (АО «ЕВРАЗ Качканарский гор-

но-обогатительный комбинат»). При этом нужно отметить, что в большинстве случаев важным фактором, определяющим увеличение или уменьшение объемов выбросов, остается соответственно увеличение или уменьшение объемов производства.

Основными источниками загрязнения атмосферы на металлургических предприятиях являются коксохимическое, агломерационное, доменное, ферросплавное и

Таблица 2. Динамика водоотведения крупнейших предприятий горно-металлургического комплекса Свердловской области в 2017–2022 гг. по данным [1, 14]**Table 2. Dynamics of water disposal of the largest enterprises of the mining and metallurgical complex of the Sverdlovsk region in 2017–2022 according to [1, 14]**

Предприятие	Водоотведение в поверхностные водные объекты, млн м ³ /год					
	2017 г.	2018 г.	2019 г.	2020 г.	2021 г.	2022 г.
АО «ЕВРАЗ Качканарский горно-обогатительный комбинат»	7,56	4,93	5,25	6,47	4,81	4,80
ОАО «Высокогорский горно-обогатительный комбинат»	14,86	12,19	13,83	11,12	14,62	10,40
АО «ЕВРАЗ Нижнетагильский металлургический комбинат»	28,35	27,39	28,49	30,32	27,48	27,64
ОАО «Каменск-Уральский металлургический завод»	2,54	2,51	2,67	3,09	3,32	3,33
ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА»	20,85	21,17	21,16	19,71	17,8	19,21
АО «Объединенная компания РУСАЛ Уральский алюминий»	32,16	33,23	32,92	33,12	24,27	22,75
ПАО «Надеждинский металлургический завод»	4,53	3,24	3,15	2,68	1,85	2,51

**Рисунок 2. Динамика водоотведения крупнейших предприятий горно-металлургического комплекса Свердловской области в 2017–2022 гг. [1, 14]****Figure 2. Dynamics of water disposal of the largest enterprises of the mining and metallurgical complex of the Sverdlovsk region in 2017–2022 [1, 14]**

сталеплавильное производства. Технологические газы содержат частицы пыли, оксиды серы, азота, метан, аэрозоли травильных растворов, перфторуглерод и др. [13, 15]. В зависимости от ветра загрязняющие вещества в выбросах металлургических производств могут распространяться на расстояния 30–40 км [13].

Уменьшение массы выбросов металлургических предприятий в атмосферу требует дальнейшего повышения эффективности очистки образуемых газов от примесей пыли, оксидов серы, азота, метана и других компонентов. Важ-

ным направлением является также увеличение объемов утилизации отходов мокрой газоочистки, что потребует дополнительных схем переработки шламов и соответствующих ресурсных и энергетических затрат. На повестке дня стоит модернизация процессов и аппаратов газоочистки, в частности, более широкое использование технологий сухих способов очистки технологических газов и схем утилизации шламов с оборотными циклами водоснабжения.

Предприятия металлургической промышленности используют воду в значительных количествах: водопотре-

бление этой отрасли составляет 15–20 % воды от общих потребностей российской промышленности. Соответственно образуются большие объемы сточных вод, лишь часть которых используется повторно.

В табл. 2 и на рис. 2 представлена динамика водоотведения крупнейших предприятий горно-металлургического комплекса Свердловской области.

Положительной тенденцией является сокращение объемов сброса загрязненных сточных вод в поверхностные водные объекты в среднем примерно на 18,2 % за рассматриваемый период для приведенных в табл. 2 предприятий. При этом следует отметить, что динамика водоотведения горных предприятий в значительной степени зависит от годовых объемов атмосферных осадков, так как сточные воды этих предприятий представлены в основном дренажными водами, откачиваемыми системами карьерного водоотлива (объем таких вод по большей части определяется количеством атмосферных осадков, выпадающих на водосборную площадь горных выработок). В свою очередь, снижение объемов сбросов металлургических предприятий может быть достигнуто дальнейшим внедрением водооборотных циклов. На ближайшее время АО «Объединенная компания РУСАЛ Уральский алюминий» запланировано начать возврат фильтрационных вод золоотвала № 2 в технологию производства с прекращением сброса сточных вод в р. Турья через выпуск № 3 [1].

Тем не менее на многих предприятиях вода после промышленного использования не очищается надлежащим образом и сбрасывается в природные водные объекты. В сточных водах металлургических заводов присутствуют тяжелые металлы, нефтепродукты, сульфаты, фосфаты, фториды, фенолы и другие примеси, вредные для водных организмов.

В Свердловской области основным источником загрязнения водных объектов является сброс загрязненных сточных вод. Наиболее распространенными загрязнениями, поступающими со сточными водами в поверхностные водные объекты, являются: взвешенные вещества, соединения тяжелых металлов, нефтепродукты, нитрит-ионы, нитрат-ионы, азот аммонийный, фосфаты и др. [1]. Сточные воды металлургических предприятий сбрасываются в реки Пышму, Тагил, Исеть Иртышского бассейнового округа. В 2022 г. отмечен экстремально высокий уровень загрязненности воды рек Пышмы и Исети. Для реки Исеть критическими показателями загрязненности являются азот нитритов, БПК₅, фосфаты, марганец, для реки Пышмы дополнительно медь, никель и растворенный кислород [1].

Несмотря на имеющиеся успехи, в металлургической отрасли остаются во многом нерешенными проблемы организации оборотного водоснабжения и бессточных металлургических производств, требующих очистки загрязненных вод до технологических нормативов, а также очистки стоков до экологических нормативов перед сбросом их в водоемы. Решение обеих проблем требует совершенствования технологий водоочистки и модернизации водоочистного оборудования. Основными направлениями снижения воздействия на водные объекты предприятиями черной металлургии являются: 1) повышение эффективности процесса очистки воды от приме-

сей; 2) совершенствование способов промывки металла после обезжиривания и травления; 3) применение новых схем воздушного охлаждения крупных металлургических агрегатов (например, печей и прокатных станов); 4) совершенствование систем оборотного водоснабжения; 5) применение испарительного охлаждения и охлаждения горячей химически очищенной водой. В области цветной металлургии требуется оптимизация схем водооборота и уменьшение потерь воды, а также повышение эффективности очистки воды от тяжелых металлов. Такая работа проводится на некоторых передовых предприятиях. Например, в 2013 г. на АО «Среднеуральский медеплавильный завод» введен в эксплуатацию комплекс очистных сооружений, состоящий из блоков физико-химической и химической очистки, позволяющий очистить стоки предприятия от ионов меди, цинка, железа, фосфатов, сульфатов и фторидов до нормативов водных объектов рыбохозяйственного назначения. Стоимость проекта составляла 1 млрд руб. Актуальной задачей очистки сточных вод предприятий цветной металлургии является не только рекуперация жидкой фазы, но и возможность попутного доизвлечения ценных примесей.

Одной из важных задач снижения негативного воздействия на окружающую среду предприятий горно-металлургического комплекса является рациональное обращение с производственными отходами, накапливаемыми во все возрастающих масштабах. Горно-обогажительные комбинаты Свердловской области ежегодно образуют десятки миллионов тонн отходов вскрышных и вмещающих пород, а также отходов обогащения. В свою очередь, на металлургических предприятиях производство одной тонны черного металла сопровождается получением 5–17 т отходов, а при производстве 1 т цветных и благородных металлов образуется до 100 т отходов. Объекты размещения отходов металлургических предприятий представляют собой техногенные образования, содержание металлов в которых зачастую находится на уровне, делающем рентабельной их переработку.

В 2022 г. только на металлургических предприятиях Свердловской области образовано 7 924 тыс. т отходов производства и потребления, что составляет 102 % от уровня 2021 г. (7771 тыс. т). Количество утилизированных и обезвреженных отходов в 2021 г. составило 6433 тыс. т. (что на 10,5 % меньше, чем в 2021 г.) [1].

Так же, как и объемы выбросов загрязняющих веществ, объемы образования отходов предприятий горно-металлургического комплекса в значительной степени зависят от их производительности. Для горных предприятий дополнительным фактором, обуславливающим увеличение образования отходов, является рост объемов добычи более бедных руд (АО «ЕВРАЗ Качканарский горно-обогажительный комбинат»), для металлургических – изменение качества используемой руды (например, АО «Объединенная компания РУСАЛ «Уральский алюминий» увеличило в 2022 г. объем образования отходов на 7,1 % в связи с уменьшением содержания Al_2O_3 в руде) [1].

Важнейшим экологическим аспектом деятельности предприятий горно-металлургического комплекса является утилизация и обезвреживание отходов. Основными направлениями утилизации и обезвреживания

для крупнейших предприятий горно-металлургического комплекса Свердловской области стали: 1) использование отходов в качестве строительных материалов (АО «ЕВРАЗ Качканарский горно-обогатительный комбинат», ОАО «Высокогорский горно-обогатительный комбинат», АО «Святогор»); 2) использование отходов при проведении рекультивации земель (ОАО «Высокогорский горно-обогатительный комбинат», АО «Святогор», ПАО «Среднеуральский медеплавильный завод»); 3) получение гранулированного шлака (АО «ЕВРАЗ Нижнетагильский металлургический комбинат», АО «Святогор», АО «Среднеуральский медеплавильный завод», ПАО «Надеждинский металлургический завод») и щебня (ПАО «Надеждинский металлургический завод», АО «Святогор»); 4) использование в качестве добавки к сырью (ОАО «Каменск-Уральский металлургический завод», ПАО «Надеждинский металлургический завод», АО «Объединенная компания РУСАЛ Уральский алюминий»). Динамика образования, размещения, обезвреживания и утилизации отходов крупнейшими предприятиями горно-металлургического комплекса Свердловской области в 2017–2022 гг. по данным [1, 14] приведена в табл. 3. На рис. 3 приведена динамика утилизации и обезвреживания отходов за тот же период. Лидерами по объему утилизации отходов являются АО «ЕВРАЗ Качканарский горно-обогатительный комбинат» (использование в качестве строительных материалов), АО «Святогор» (использование в качестве строительных материалов, рекультивационного материала и для получения гранулированного шлака и щебня) и ОАО «Высокогорский горно-обогатительный комбинат» (использование в качестве строительных материалов и рекультивационного материала).

Техногенные минеральные образования – объекты размещения отходов – обладают огромным ресурсным потенциалом [16]. Освоение техногенных месторождений может способствовать увеличению минерально-сырьевой базы и привести к улучшению экологической ситуации, в частности, в местах расположения горнодобывающих предприятий [17]. Отходы предприятий металлургии могут быть источником сырья для металлургии, производства строительных материалов, строительства, сельского хозяйства, промышленной и бытовой химии и других отраслей хозяйства. На Среднем Урале сосредоточено 9,6 млрд т отходов производства. Размещено свыше 220 млн т хвостов обогащения, свыше 110 млн т медных шлаков, содержащих в среднем 0,37 % меди, 2,29 % цинка и 0,98 % серы, а также более 7 т золота и 150 т серебра, 23 тыс. т висмута и 8 тыс. т кадмия. В отработанных и законсервированных хвостохранилищах уральских обогатительных фабрик медного комплекса находится более 50 млн т отходов, содержащих 0,33 % меди, 0,5 % цинка и 28,2 % серы. Наибольшую ценность в хвостах обогащения уральских руд представляют сера (30–50 % общей стоимости хвостов), драгоценные металлы (25–45 %), медь (10–20 %) и цинк (10–15 %).

Отвалы и шламохранилища требуют отведения больших площадей плодородных территорий и вырубки лесов. Под действием атмосферных явлений загрязняющие вещества из отвалов попадают в почвенные слои и выносятся в водные объекты – болота, ручьи, реки, нанося ущерб почвенным и водным экосистемам. Выведенные из эксплуатации шлаковые отвалы, полигоны промышленных отходов, шламо- и хвостохранилища, отвалы пустых пород и отходов обогащения горных предприятий пере-

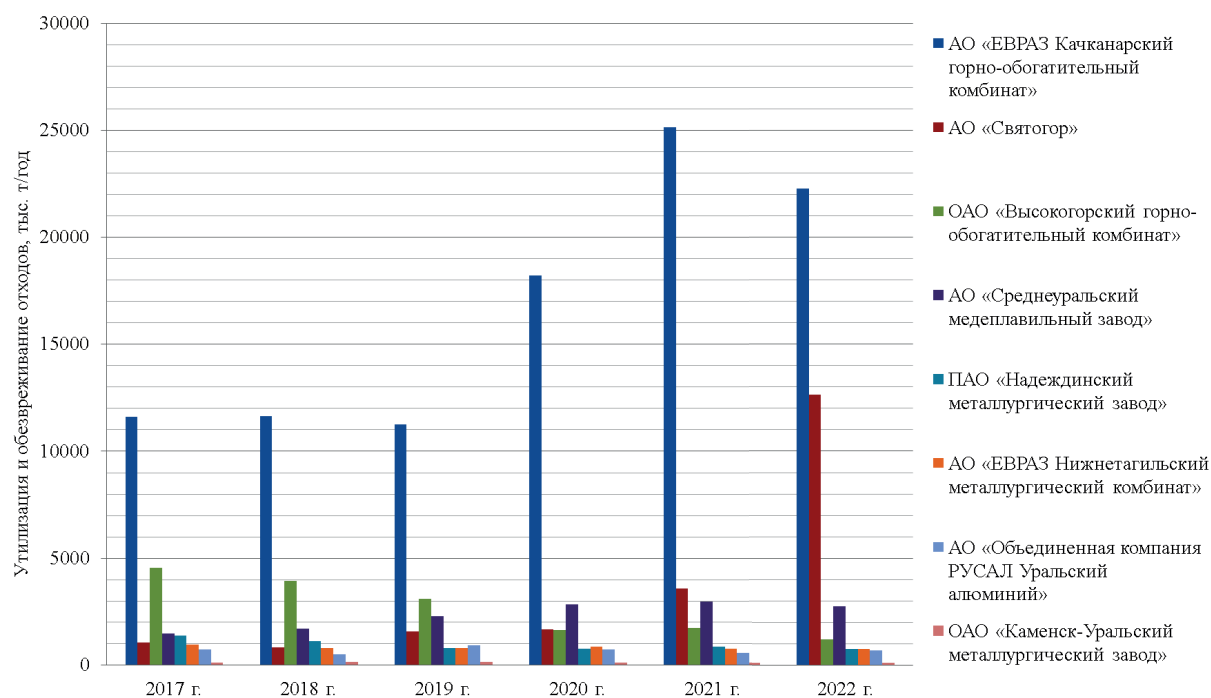


Рисунок 3. Динамика утилизации отходов крупнейшими предприятиями горно-металлургического комплекса Свердловской области в 2017–2022 гг., тыс. т/год

Figure 3. Dynamics of waste disposal by the largest enterprises of the mining and metallurgical complex of the Sverdlovsk region in 2017–2022, thousand tons/year

Таблица 3. Сведения об обращении с отходами на крупнейших предприятиях горно-металлургического комплекса Свердловской области в 2017–2022 гг. [1, 14]
 Table 3. Information on waste management at the largest enterprises of the mining and metallurgical complex of the Sverdlovsk region in 2017–2022 [1, 14]

2017 г.	2018 г.	2019 г.	2020 г.	2021 г.	2022 г.	Размещено и временно складировано отходов, тыс. т/год											
						2017 г.	2018 г.	2019 г.	2020 г.	2021 г.	2022 г.						
57 655,9	57 733,3	54 812,50	56 611,8	56 969,0	59 036,8	11 603,0	11 650,6	11 271,20	18 208,3	25 144,1	22 291,4	46 033,40	46 015,9	43 478,80	40 802,9	31 919,3	39 485,9
АО «ЕВРАЗ Качканарский горно-обогатительный комбинат»																	
24 137,7	22 762,6	21 047,20	25 982,1	41 937,3	51 257,2	1058,0	828,1	1551,50	1670,0	3581,6	12 640,7	23 088,80	21 935,5	19 621,50	24 722,4	40 072,6	40 791,7
АО «Святогор»																	
4354,4	3955,0	3095,90	1618,6	1571,7	1220,7	4556,0	3945,5	3099,20	1634,8	1715,9	1211,0	< 0,01	6,0	0,00	0,0	0,0	0,0
ОАО «Высокогорский горно-обогатительный комбинат»																	
2045,7	1980,3	2181,90	2244,3	2271,7	2365,4	1462,4	1677,7	2260,60	2861,0	2985,1	2765,9	55,30	57,3	57,10	63,6	64,0	344,5
АО «Среднеуральский меддеплавильный завод»																	
581,1	593,5	546,11	551,4	545,3	521,0	1360,4	1119,5	795,18	766,2	857,1	744,9	35,80	51,8	73,07	38,3	50,8	50,5
ПАО «Надеждинский металлургический завод»																	
1152,2	1100,1	1169,00	1250,5	1071,3	1091,6	955,3	783,0	781,50	834,0	751,7	759,0	143,50	148,2	173,00	243,4	170,2	182,0
АО «ЕВРАЗ Нижнетагильский металлургический комбинат»																	
3154,4	2935,9	3685,60	3582,3	3289,2	3521,3	717,1	488,4	898,20	708,4	563,0	702,4	2423,70	2431,9	2766,20	2855,6	2705,9	2793,5
АО «Объединенная компания РУСАЛ Уральский алюминий»																	
129,7	141,5	143,90	133,3	124,7	113,5	121,7	132,9	133,00	124,0	116,3	106,0	6,10	6,0	8,60	8,3	8,2	8,3
ОАО «Каменск-Уральский металлургический завод»																	

ходят в разряд объектов накопленного вреда окружающей среде, продолжая оказывать негативное воздействие на нее. Следует отметить, что большинство предприятий горно-металлургического комплекса и их объектов накопленного вреда окружающей среде либо непосредственно примыкают к жилой застройке городов, либо находятся в городской черте, что обуславливает их значительное влияние не только на окружающую среду в целом, но и на здоровье населения в частности. Снижение влияния объектов накопленного вреда окружающей среде предприятий горно-металлургического комплекса должно базироваться на комплексном территориальном эко-технологическом подходе, включающем в себя проработку разнообразных и разнокачественных природно-технологических, экономических, управленческих и социальных аспектов, учет их взаимосвязи и взаимопроникновения. На технологическом уровне эта задача должна решаться путем: 1) разработки и внедрения прогрессивных технологий утилизации отходов, образующихся в настоящее время (что остается в горной и металлургической промышленности актуальной проблемой на протяжении последних десятилетий) – это позволит сократить объемы складирования отходов и снизит тем самым потенциальный рост накопленного вреда окружающей среде; 2) разработки техногенных минеральных образований с минимизацией негативного влияния этого процесса на окружающую среду; 3) рекультивации объектов накопленного вреда окружающей среде.

На большинстве металлургических предприятий Свердловской области за прошедшее пятилетие наблюдается тенденция к снижению объемов выбросов в атмосферу, сбросов сточных вод в водные объекты и объемов образованных и временно размещенных отходов. Однако пока еще эта тенденция в значительной степени определяется динамикой изменения объемов выпуска продукции, а не модернизацией технологических производственных и природоохранных процессов.

Одной из основных причин медленного уменьшения негативного влияния металлургических предприятий на состояние окружающей среды является использование устаревшего, изношенного, низкоэффективного металлургического оборудования. Износ оборудования горно-металлургического комплекса России составляет в среднем немногим менее 50 % (для добычи металлических руд на 2018 г. показатель износа составил 45,6 %, для металлургического производства – 50,6 %¹).

Заключение

Указ Президента Российской Федерации от 21.07.2020 г. № 474 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года» определяет, что одной из стратегических целей государственной политики нашей страны является создание комфортной и безопасной среды для жизни. Одной из составляющих такой среды является благоприятное состояние окружающей среды. Целью промышленных предприятий, таким образом, в сфере восстановления, использования и охраны природных ресурсов на ближайшее десятилетие остается экологизация производства. В металлургии этот подход подразумевает

разработку и внедрение ресурсо- и энергосберегающих технологий, а также разработку и внедрение малоотходных технологий, ориентированных на выпуск высококачественной конкурентоспособной продукции с условием комплексного использования сырья и минимальных потерь ценных компонентов [18].

Важную роль играет совершенствование схем использования тепловой и электрической энергии в производственных процессах. Использование вторичной тепловой энергии позволит снизить объемы сжигаемого топлива и, соответственно, выбросов продуктов их сгорания в атмосферу. Перспективными являются переход от экологически грязных видов топлива (мазут, уголь и т. п.) к более экологически чистым (продукты газификации, биогаз), а также замена энергии топлива на экологически чистую электроэнергию. Требуется решения проблема повышения эффективности газоочистки на основе наилучших современных технологий сухой и полусухой очистки, включающих утилизацию загрязняющих веществ. Необходимо существенное сокращение водопотребления в технологических процессах, применение маловодных технологий и бессточных схем водообеспечения, увеличение масштабов использования современных передовых методов и реагентов для очистки сточных вод металлургических производств и переработки осадков с глубоким извлечением и утилизацией выделяемых примесей. Для улучшения экологической обстановки в зонах влияния металлургических предприятий необходима более активная рекультивация полигонов промышленных отходов, шлаковых отвалов, шламонакопителей с последующим их восстановлением до естественного состояния.

Важным этапом снижения экологической нагрузки на территории Свердловской области является совершенствование системы экологического мониторинга и прогноза качества окружающей среды в районе расположения предприятий горно-металлургического комплекса и мест размещения их отходов. В условиях ограниченности ресурсов такая система может позволить не только определить приоритетные экологические задачи для предприятий горно-металлургического комплекса, но и обосновать выбор наиболее эффективных природоохранных мероприятий, направленных на снижение экологической нагрузки в районе их расположения. По мнению авторов, важным этапом совершенствования законодательства в области мониторинга окружающей среды и производственного экологического контроля является добавление в отчеты по мониторингу качества окружающей среды в районе мест размещения отходов и отчет по производственному экологическому контролю раздела «прогноз качества окружающей среды». Такая информация позволит руководству предприятий оптимизировать свои эколого-экономические риски, а надзорным органам и управленческим структурам обеспечить снижение экологической нагрузки на территорию. Кроме того, результаты прогноза качества окружающей среды являются одной из основ для принятия соответствующих управленческих, организационных и технологических решений, направленных на улучшение экологической ситуации в регионе.

¹ <https://www.finam.ru/publications/item/metallurgi-i-poshliny-sistema-stimulov-ili-podderzhka-vnutrennego-rynka-20210706-145600/>

В заключение отметим, что реализация сложных и масштабных задач, связанных со снижением нагрузки на окружающую среду со стороны предприятий горно-металлургического комплекса, требует внедрения серьезных научно-практических разработок с соответствующей финансовой поддержкой и проведения последовательной государственной политики.

ЛИТЕРАТУРА

1. О состоянии окружающей среды на территории Свердловской области в 2022 году: гос. доклад. URL: <https://mprso.midural.ru/uploads/2023/06/%D0%93%D0%BE%D1%81%D0%B4%D0%BE%D0%BA%D0%BB%D0%B0%D0%B4%202022.zip>
2. Семячков А. И. Методология оценки техногенной трансформации окружающей среды под воздействием горно-металлургических комплексов / под ред. А. И. Татаркина. Екатеринбург: Ин-т экономики УрО РАН, 2007. 347 с.
3. Почечун В. А., Семячков А. И., Курбанов И. К. Геоэкология поверхностных и подземных вод на Среднем Урале: на примере Полевского и Качканарского горных районов Свердловской области // ГИАБ. 2021. № 11-1. С. 90–97. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_111_0_90
4. Семячков А. И., Почечун В. А. Методологические основы оценки воздействия горнопромышленных комплексов на окружающую среду // Устойчивое развитие горных территорий. 2021. Т. 13. № 2(48). С. 215–223. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2021-13-2-215-223>
5. Макаров А. Б., Гуман О. М., Антонова И. А., Захаров А. В. Трансформация геологической среды при разработке медноколчеданных месторождений Урала // ГИАБ. 2018. № 6. С. 98–106. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-6-0-98-106>
6. Боброва З. М., Ильина О. Ю., Студенок Г. А., Цейтлин Е. М. Воздействие предприятий минерально-сырьевого комплекса Урала на водные ресурсы // Известия УГГУ. 2016. Вып. 1(41). С. 62–66.
7. Боброва З. М., Ильина О. Ю., Хохряков А. В., Цейтлин Е. М. Применение отходов горно-металлургических и металлургических производств в целях рационального природопользования // Известия УГГУ. 2015. Вып. 4(40). С. 16–26.
8. Urošević S., Vuković M., Pejčić B., Štrbac N. Mining-metallurgical sources of pollution in Eastern Serbia and environmental consciousness // Revista Internacional de Contaminación Ambiental. 2018. Vol. 34. No. 1. P. 103–115. <https://doi.org/10.20937/RICA.2018.34.01.09>
9. Alimbaev T., Mazhitova Zh., Beksultanova Ch., Kyzy N. T. Activities of mining and metallurgical industry enterprises of the Republic of Kazakhstan: environmental problems and possible solutions // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 175. Article number 14019. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017514019>
10. Izydorczyk G., Mikula K., Skrzypczak D., Moustakas K., Witek-Krowiak A., Chojnacka K. Potential environmental pollution from copper metallurgy and methods of management // Environmental Research. 2021. Vol. 197. Article number 111050. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111050>
11. Информационный паспорт Свердловской области за 2021 год. URL: <https://made-in-ural.ru/analitika/informatsionnyy-pasport-sverdlovskoy-oblasti-za-yanvar-noyabr-2021-goda/>
12. Управление Федеральной службы государственной статистики по Свердловской области и Курганской области. Производство основных видов промышленной продукции по Свердловской области в январе–июне 2023 г. URL: [https://66.rosstat.gov.ru/storage/mediabank/%D0%9F%D1%80%D0%BE%D0%B8%D0%B7%D0%B2%D0%BE%D0%B4%D1%81%D1%82%D0%B2%D0%BE%D0%9F%D1%80%D0%BE%D0%B8%D0%B7%D0%B2%D0%BE%D0%B4%D1%81%D1%82%D0%B2.docx](https://66.rosstat.gov.ru/storage/mediabank/%D0%9F%D1%80%D0%BE%D0%B8%D0%B7%D0%B2%D0%BE%D0%B4%D1%81%D1%82%D0%B2%D0%BE%D0%9F%D1%80%D0%BE%D0%B8%D0%B7%D0%B2%D0%BE%D0%B4%D1%81%D1%82%D0%B2%D0%BE%D0%9F%D1%80%D0%BE%D0%B8%D0%B7%D0%B2%D0%BE%D0%B4%D1%81%D1%82%D0%B2.docx)
13. Яковлева С. Н., Фадеев И. С., Малахов Н. Н. Современные методы повышения экологической безопасности производственных процессов металлургического предприятия // Безопасный и комфортный город: сборник науч. трудов по материалам IV междунар. науч.-практ. конф. (Орел, 16–17 июня 2020 г.). Орел: ОГУ им. И. С. Тургенева, 2020. С. 578–582. <https://elibrary.ru/fyrosi>
14. О состоянии окружающей среды на территории Свердловской области (2017–2021 гг.): гос. доклады. URL: <https://mprso.midural.ru/article/show/id/1126>
15. Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов МГЭИК. URL: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/russian/index.html>
16. Российская академия наук. 23 марта 2021 года состоялось очередное заседание Президиума Российской академии наук. URL: <https://www.ras.ru/news/shownews.aspx?id=e1ee0bec-8175-465f-a795-f3cf9391e1f1>
17. Макаров А. Б., Хасанова Г. Г., Талалай А. Г. Техногенные месторождения: особенности исследований // Известия УГГУ. 2019. Вып. 3(55). С. 58–62. <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-3-58-62>
18. Смирнякова В. В. Экозащитные технологии металлургического производства // Записки Горного института. 2013. Т. 203. С. 108–111.

Статья поступила в редакцию 29 мая 2023 года

Impact of enterprises of the mining and metallurgical complex of the Sverdlovsk region on the environment and directions of its reduction

Irina Vladimirovna MEDVEDEVA^{1,2*}

Elizaveta Vladislavovna AMIROVA¹

Gennadiy Andreevich STUDENOK^{1**}

Evgeniy Mikhailovich TSEITLIN^{1***}

Ol'ga Mikhailovna MEDVEDEVA³

¹Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia

²M. N. Mikheev Institute of Metal Physics of the Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russia

³Ural State Medical University, Ekaterinburg, Russia

Abstract

Purpose of the work. A long-term intensive work of mining and metallurgical enterprises in Sverdlovsk region, caused by the presence of a large number of ore deposits, inevitably leads to the serious negative environmental impact. The purpose of this work is the analysis of this impact in recent years, measures taken by the largest enterprises for its reduction and the assessment of area and abilities of the work in this direction.

Methodology. In this work, data from open sources for analysis and systematization were used – government reports on the state of the environment in Sverdlovsk region, scientific reports, official statistical data.

Results and their field of application. There are data on environmental impact of the largest mining and metallurgical enterprises of Sverdlovsk region: JSC “EVRAZ Kachkanarskiy ore mining and processing combine”, JSC “Vysokogorskiy mining and processing combine”, JSC “Nizhnetagilskiy metallurgical combine”, JSC “United Company RUSAL Ural’s aluminum” and others analyzed and systematized. There are the opportunities of this negative impact reduction and required direction of actions according to the authors described: 1) development and implementation of the integrated territorial eco-technological approach that includes the elaboration of various and heterogeneous natural-technological, economic, managerial and social aspects; 2) implementation of green technologies; 3) environmental quality prediction and the use of prediction data when implementing production activity.

Conclusions. A number of large enterprises of the industry show the trend of the improving of ecological performance through a variety of activities in the area of environmental protection. It should be noted that one of the factors mainly determining the degree of environmental impact, remains the volume of production. The implementation of complex and ambitious tasks related to the environmental impact of the mining and metallurgical enterprises reduction requires the introduction of serious scientific and practical developments with appropriate financial support and consistent implementation of state policy.

Keywords: mining and metallurgical complex, environmental pollution, environmental protection, integrated approach, accumulated environmental damage, environmental quality prediction.

REFERENCES

1. On environment state in the Sverdlovsk region in 2022: State report. 2023. (*In Russ.*) URL: <https://mprso.midural.ru/uploads/2023/06/%D0%93%D0%BE%D1%81%D0%B4%D0%BE%D0%BA%D0%BB%D0%B0%D0%B4%202022.zip>
2. Semyachkov A. I. 2007, Methodology for assessing technogenic transformation of the environment under the influence of mining and metallurgical complexes: edited by A. I. Tatarkin. Ekaterinburg, 347 p. (*In Russ.*)
3. Pochechun V. A., Semyachkov A. I., Kurbanov I. K. 2021, Surface and groundwater geocology in the Middle Urals: a case-study of Polevskoy and Kachkanar mining districts, Sverdlovsk region. *GIAB* [Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)], no. 11-1, pp. 90–97. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_111_0_90
4. Semyachkov A. I., Pochechun V. A. 2021, Estimation methodology of mining industrial complexes impact on environment. *Ustoychivoe razvitie gor'nykh territoriy* [Sustainable Development of Mountain Territories], vol. 13, no. 2, pp. 215–223. (*In Russ.*) <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2021-13-2-215-223>
5. Makarov A. B., Guman O. M., Antonova I. A., Zakharov A. V. 2018, Transformation of geological environment in copper pyrite mining in the Urals. *GIAB* [Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)], no. 6, pp. 98–106. (*In Russ.*) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-6-0-98-106>
6. Bobrova Z. M., Il'ina O. Yu., Studenok G. A., Tseitlin E. M. 2016, Impact of enterprises of Ural mineral resource complex on water resources. *Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta* [News of the Ural State Mining University], issue 1(41), pp. 62–66. (*In Russ.*)

✉ief.ie@m.ursmu.ru

**Gennadiy.Studenok@m.ursmu.ru

***tseitlin.e.m@gmail.com

7. Bobrova Z. M., Il'ina O. Yu., Khokhryakov A. V., Tseytlin E. M. 2015, Utilization of waste of mining-metallurgical and metallurgical production for environmental management. *Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta* [News of the Ural State Mining University], iss. 4(40), pp. 16–26. (In Russ.)
8. Urošević S., Vuković M., Pejčić B., Štrbac N. 2018, Mining-metallurgical sources of pollution in Eastern Serbia and environmental consciousness. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, vol. 34, no. 1, pp. 103–115. <https://doi.org/10.20937/RICA.2018.34.01.09>
9. Alimbaev T., Mazhitova Zh., Beksultanova Ch., Kzy N. T. 2020, Activities of mining and metallurgical industry enterprises of the Republic of Kazakhstan: environmental problems and possible solutions. *E3S Web of Conferences*, vol. 175, article number 14019. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017514019>
10. Izydorczyk G., Mikula K., Skrzypczak D., Moustakas K., Witek-Krowiak A., Chojnacka K. 2021, Potential environmental pollution from copper metallurgy and methods of management. *Environmental Research*, vol. 197, article number 111050. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111050>
11. Information passport of Sverdlovsk region for 2021, 2021. (In Russ.) URL: <https://made-in-ural.ru/analitika/informatsionnyy-pasport-sverdlovskoy-oblasti-za-yanvar-noyabr-2021-goda/>
12. Federal State Statistics Service Office for the Sverdlovsk region and Kurgan region. Production of main industrial products in Sverdlovsk region for January–July 2023. (In Russ.) URL: <https://66.rosstat.gov.ru/storage/mediabank/%D0%9F%D1%80%D0%BE%D0%B8%D0%B7%D0%B2%D0%BE%D0%B4%D1%81%D1%82%D0%B2%D0%BE%20%D1%8F%D0%BD%D0%B2%D0%B0%D1%80%D1%8C-%D0%B8%D1%8E%D0%BD%D1%8C%202023%20%D0%B3.docx>
13. Yakovleva S. N., Fadeev I. S., Malakhov N. N. 2020, Modern methods of increasing the environmental safety of metallurgical enterprise production processes. *Bezopasnyy i komfortnyy gorod: Sbornik nauchnykh trudov po materialam IV mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Safe and comfortable city: Collected works based on the materials of the IV international scientific and practical conference (Orel, 16–17 June 2020)]. Orel, pp. 578–582. <https://elibrary.ru/fyrosi>
14. On environment state in the Sverdlovsk region in 2017–2021: State reports. (In Russ.) URL: <https://mprso.midural.ru/article/show/id/1126>
15. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. (In Russ.) URL: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/russian/index.html>
16. Russian Academy of Sciences. On 23th March, 2021 a regular session of the Russian Academy of Sciences Presidium was held, 2021. (In Russ.) URL: <https://www.ras.ru/news/shownews.aspx?id=e1ee0bec-8175-465f-a795-f3cf9391e1f1>
17. Makarov A. B., Khasanova G. G., Talalay A. G. 2019, Technogenic Deposits: Research Features. *Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta* [The News of the Ural State Mining University], issue 3(55), pp. 58–62. (In Russ.) <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-3-58-62>
18. Smirnyakova V. V. 2013, Environmental friendly technologies of the metallurgic production. *Zapiski Gornogo Instituta* [Journal of Mining Institute], vol. 203, pp. 108–111.

The article was received on May 29, 2023

Сейсмические события Свердловской области за период 1788–2022 гг.

Анастасия Юрьевна ОСИПОВА*

Вячеслав Юрьевич ОСИПОВ**

Геннадий Иванович ПАРЫГИН***

Институт геофизики им. Ю. П. Булашевича УрО РАН, Екатеринбург, Россия

Аннотация

Введение. Свердловская область является крупным промышленным центром, где расположены горнодобывающие предприятия, химические заводы, водохранилища, электростанции большой мощности, соседствующие с крупными городами. В настоящее время на территории области ежегодно регистрируется около 400 сейсмических событий, большая часть которых являются техногенными. Для обеспечения сейсмической безопасности объектов повышенной ответственности и особо ответственных объектов строительства необходимо выполнение работ по детальному сейсмическому районированию рассматриваемой территории, первым этапом которого являются результаты данной работы.

Методика работы. Обобщены исторические и инструментальные каталожные данные за период 1788–2022 гг., выполнены обработка и анализ инструментальных записей местных сейсмических событий, зарегистрированных временными передвижными сейсмостанциями Института геофизики УрО РАН (ИГФ УрО РАН), и составлен сводный унифицированный каталог сейсмических событий, произошедших на территории Свердловской области.

Результаты работы. Анализ сейсмических событий региона показал, что большинство регистрируемых сейсмических событий – это промышленные взрывы и горнорудные землетрясения. Данные сейсмические события регистрируются в районе городов Асбест, Екатеринбург, Ревда, Нижний Тагил, Кушва, Качканар, Карпинск, Североуральск. Также на территории области неоднократно фиксировались и тектонические землетрясения. Большая часть из них не ощущается людьми, но ряд событий, магнитуда которых более 4,0, имеет макросейсмические проявления. Самым сильным является событие 17.08.1914 ($M_s = 5,0$, координаты эпицентра 57.09° с. ш., 59.8° в. д.). Сила сотрясения в эпицентре составила 6,0 баллов по шкале MSK-64. Составленный каталог тектонических землетрясений послужит основой для дальнейшего определения параметров сейсмического режима исследуемой территории.

Ключевые слова: каталог сейсмических событий, Свердловская область, сейсмичность, землетрясения, детальное сейсмическое районирование.

Введение

Свердловская область – один из самых крупных регионов Уральского федерального округа, развитый промышленный центр с высокой концентрацией особо ответственных объектов, а также объектов повышенной ответственности, соседствующих с крупными населенными пунктами, и большим количеством горнодобывающих предприятий. Расположена она в пределах восточной окраины Восточно-Европейской платформы, средней, северной частей Уральской горно-складчатой системы и западной части Западно-Сибирской плиты, далеко от современных региональных сейсмоактивных зон, в которых локализованы очаги разрушительных землетрясений с магнитудой 6,0 и более, силой сотрясения в эпицентрах 7,0–8,0 баллов по шкале MSK-64 и более. В то же время на территории Свердловской области отмечаются редко происходящие местные сейсмические события силой до

5,0–6,0 баллов по шкале MSK-64. Природа их различна. В исследуемом регионе регистрируется большое количество промышленных взрывов, горнорудных событий, реже регистрируются тектонические землетрясения. Определение их природы крайне важно для сейсмического районирования территории. В данной работе приведен анализ сейсмических событий Свердловской области с 1788 по 2022 г., отдельно рассмотрен и представлен каталог тектонических землетрясений.

Содержание работ

Сведения о сейсмических событиях Урала содержатся в работах [1–10]. В них представлены каталоги землетрясений региона за разный временной период. Имеется ряд принципиальных отличий в характеристиках нескольких сейсмических событий, особенно это касается доинструментального и раннего инструментального периодов наблюдений. При составлении сводного каталога событий

✉ seismolab@mail.ru

** igf_us@mail.ru

*** usc_gena@mail.ru

Свердловской области и их анализе основными опорными работами послужили:

1. Монографии [5, 10], авторы которых собрали и опубликовали первичные материалы по сейсмическим событиям с древнейших времен до 2002 г., уточнили их параметры и природу, устранили ошибочные землетрясения;

2. Ежегодные издания «Землетрясения Северной Евразии» ФИЦ ЕГС РАН [2], в которых представлены результаты непрерывного сейсмического мониторинга различных регионов территории России и ряда других стран. Для Урала опубликованы каталоги сейсмических событий, начиная с 2003 г. Помимо основных параметров для всех землетрясений в них рассчитаны значения магнитуды M_s (магнитуда по поверхностной волне Релея), указана природа событий;

3. Региональный каталог сейсмических событий ГИ УрО РАН [9]. В нем содержатся сейсмические события, начиная с 2010 г., они разделены на взрывы и микроземлетрясения.

4. Каталоги (бюллетени) сейсмических событий ИГФ УрО РАН. В них представлены сведения о сейсмических событиях, которые были зарегистрированы временными передвижными станциями института в разные периоды наблюдений.

Развернутая силами ГИ УрО РАН (г. Пермь) в сотрудничестве с ФИЦ ЕГС РАН (г. Обнинск) в рамках сейсмического мониторинга Западного Урала, сеть станций позволяет в значительной степени улучшить представление о сейсмичности Уральского региона в целом. Начиная с 1999 г. события с магнитудой 2,5 и более здесь фиксируются без пропусков [9].

На рис. 1 представлена диаграмма, на которой показано процентное соотношение разных по природе сейсмических событий, зарегистрированных на территории Свердловской области за период 1788–2022 гг. В связи со значительным количеством промышленных и горно-

добывающий предприятий в рассматриваемом регионе подавляющее большинство фиксируемых событий – это техногенные: взрывы (82,6 %) и горнорудные землетрясения (16,52 %). Наибольшее количество взрывов, произведенных в карьерах и шахтах горнодобывающих предприятий, регистрируется в районе городов Асбест, Екатеринбург, Ревда, Нижний Тагил, Кушва, Качканар, Карпинск (рис. 2). Наиболее полная информация об этих событиях имеется с 2010 г. В последнее время их количество достигло примерно 320–430 событий в год. Магнитуда варьирует от 0,9 до 3,3 [9]. Горнорудные сейсмические события наблюдаются в районе г. Североуральска (СУБР) и г. Нижнего Тагила (Высокогорский ГОК). Ежегодно регистрируется около 30–50 событий магнитудой примерно от 0,7 до 4,5 [2, 9]. На рис. 3 представлены сейсмограммы, полученные на временном пункте наблюдения «В. Сысерть»: а) взрыва, произведенного в карьере в районе г. Асбеста Свердловской области; б) микроземлетрясения (горного удара), произошедшего в районе г. Североуральска Свердловской области.

Выполнение интенсивных открытых и подземных горных работ, включающих извлечение и перемещение огромных масс пород и применение массовых взрывов, в состоянии изменить геодинамический режим и сеймотектоническую обстановку в регионе [11].

На третьем месте, менее 1 % от общего числа регистрируемых событий, – тектонические землетрясения. За период с 1788 по 2022 г. на территории Свердловской области зарегистрировано 29 событий такой природы (табл. 1). Большая их часть, 17 событий – это землетрясения магнитудой до 3,0. Меньшее количество, 7 землетрясений, имеют магнитуду от 3,0 до 4,0; 4 землетрясения – магнитуду от 4,0 до 5,0; 1 событие – магнитуду 5,0.

Самым сильным является событие 17.08.1914 ($M_s = 5,0$, координаты эпицентра 57.09° с. ш., 59.8° в. д.).

Сейсмические события, зарегистрированные на территории Свердловской области за период 1788–2022 гг.

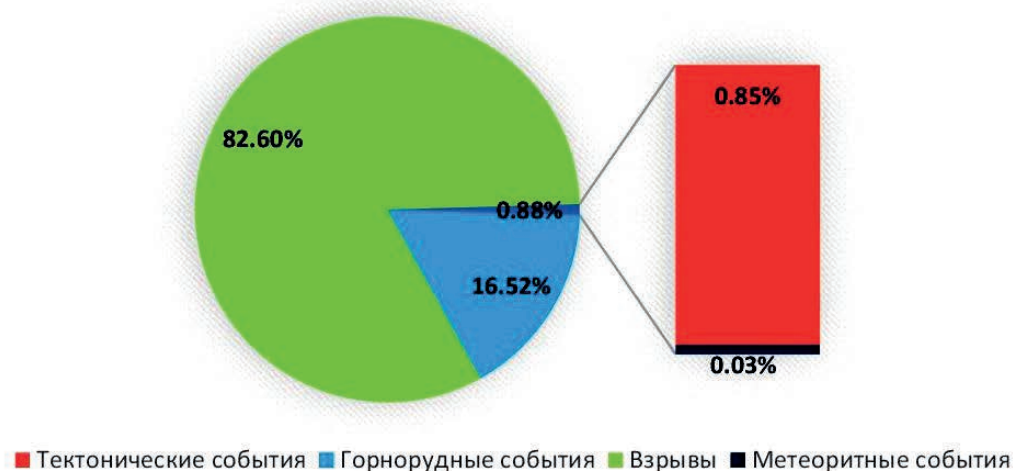


Рисунок 1. Диаграмма сейсмических событий, зарегистрированных на территории Свердловской области за период 1788–2022 гг.
Figure 1. Diagram of seismic events recorded in the territory of the Sverdlovsk region for the period 1788–2022

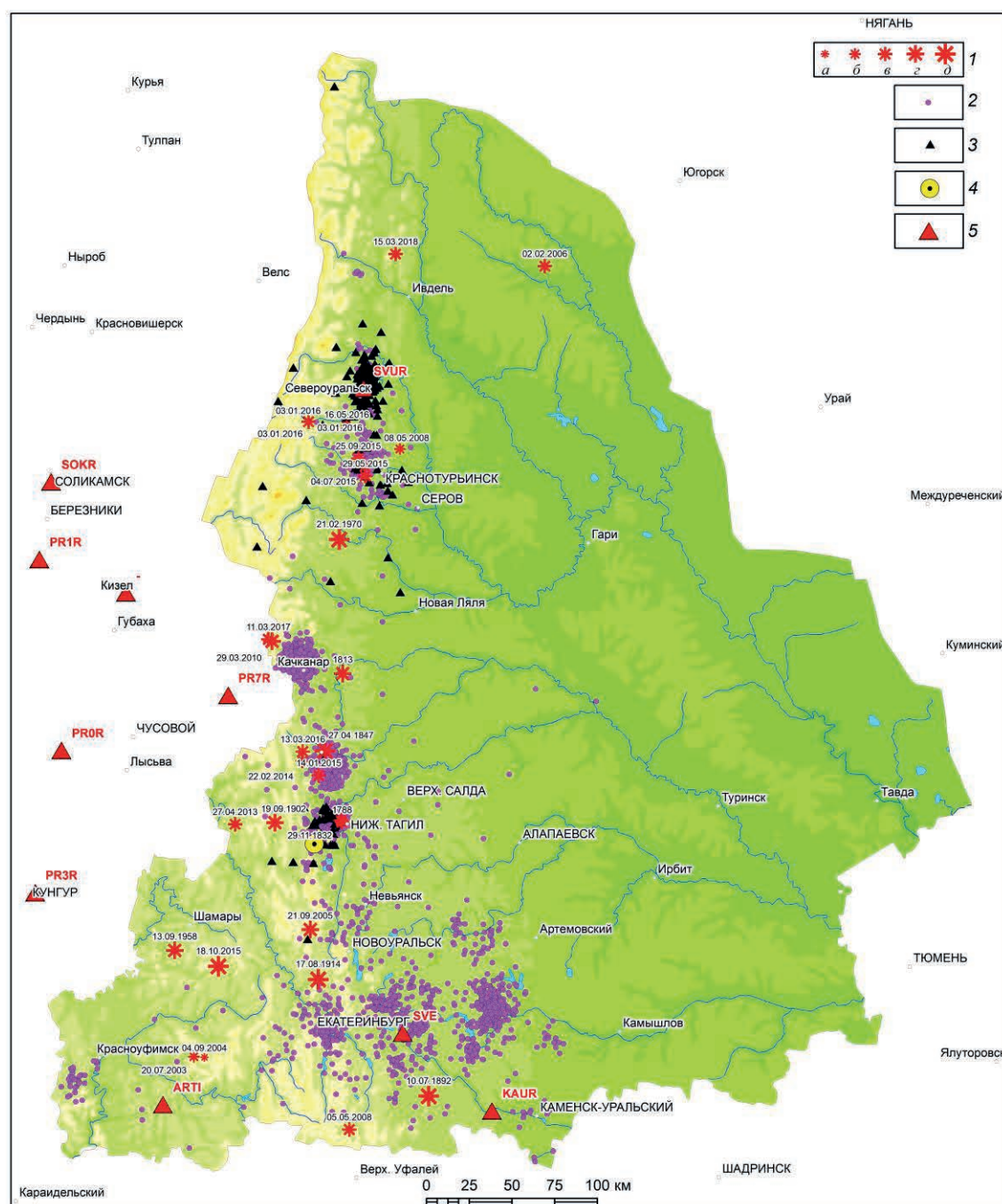


Рисунок 2. Схема расположения эпицентров сейсмических событий, зарегистрированных за период 1788–2022 гг. на территории Свердловской области: 1 – эпицентры тектонических событий магнитудой: а – $M \leq 1,0$; б – $1,0 < M \leq 2,0$; в – $2,0 < M \leq 3,0$; г – $3,0 < M \leq 4,0$; д – $4,0 < M \leq 5,0$; 2 – эпицентры взрывов; 3 – эпицентры горнорудных событий; 4 – эпицентр метеоритного события; 5 – станции сейсмического мониторинга

Figure 2. Scheme of the location of the epicenters of seismic events recorded for the period 1788–2022 in the territory of the Sverdlovsk region: 1 – epicenters of tectonic events, magnitude: а – $M \leq 1,0$; б – $1,0 < M \leq 2,0$; в – $2,0 < M \leq 3,0$; г – $3,0 < M \leq 4,0$; д – $4,0 < M \leq 5,0$; 2 – epicenters of explosions; 3 – epicenters of mining events; 4 – epicenter of meteor event; 5 – seismic monitoring stations

Сила сотрясения в эпицентре составила 6,0 баллов по шкале MSK-64. Свое название землетрясение получило от Билимбаевского завода, где оно произвело наибольшие разрушения. Эпицентр находился приблизительно в 30 км к северо-востоку от завода. Во время этого события ощутимыми сотрясениями был охвачен Средний Урал и прилегающие части Северного и Южного Урала [3–8, 10, 12]. На большей части территории Свердловской области оно ощущалось как 4–5-балльное. Данное землетрясение и по настоящий

день остается самым сильным инструментально зарегистрированным сейсмическим событием Среднего Урала.

В последние годы наиболее сильные землетрясения в данном регионе были зарегистрированы 29.03.2010 ($M_s = 3,9$; координаты эпицентра $58,85^\circ$ с. ш. и $59,17^\circ$ в. д.) и 18.10.2015 ($M_s = 4,4$; координаты эпицентра $57,13^\circ$ с. ш., $58,83^\circ$ в. д.) [2, 9].

Событие 29 марта 2010 г. произошло в 21 ч 2 м 11 с по Гринвичу (30 марта примерно в 3 ч ночи по местно-

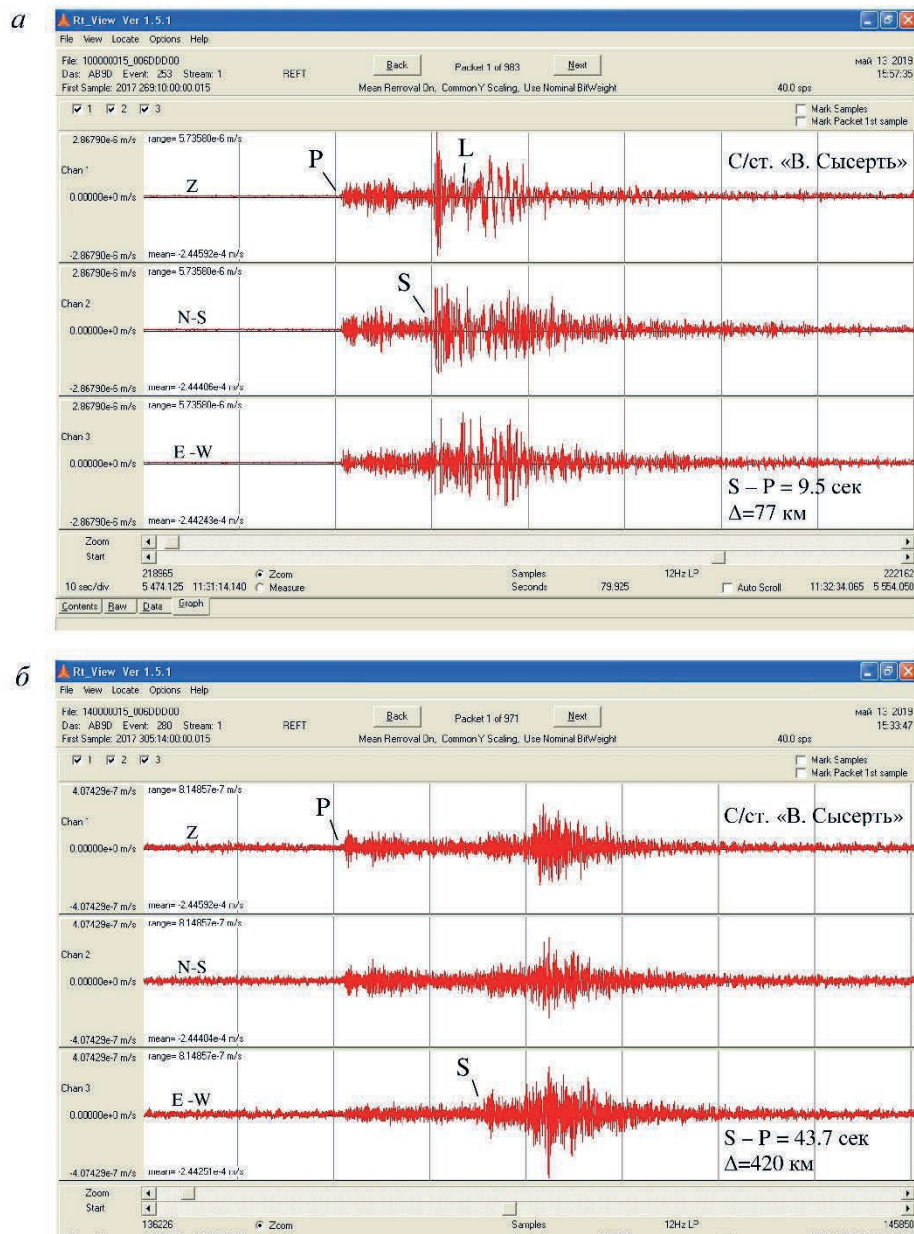


Рисунок 3. Сейсмограммы: а – промышленного взрыва, произведенного в карьере в районе г. Асбеста Свердловской области. Время в очаге по Гринвичу – 2017-09-26, 11:31:22, широта 57.0° N, долгота 61.5° E, магнитуда по длительности записи $M_d = 2,5$; б – микроземлетрясения (горного удара), произошедшего в районе г. Североуральска Свердловской области. Время в очаге по Гринвичу – 2017-11-01, 14:56:48, широта 60.2° N, долгота 60.0° E, магнитуда по длительности записи $M_d = 2,4$. Сейсмограммы получены на временном пункте наблюдения «В. Сысерть»: широта 56.44° N, долгота 60.72° E (запись скорости смещений). Компоненты записи: Z – вертикальная, N–S и E–W – горизонтальные север–юг и восток–запад. P, S, L – первые вступления продольных, поперечных и поверхностных волн
Figure 3. Seismograms: a – an industrial explosion produced in a quarry near the city of Asbest, Sverdlovsk region. Time in the source according to GMT – 2017-09-26, 11:31:22, latitude 57.0° N, longitude 61.5° E, magnitude according to the duration of the record $M_d = 2,5$; b – micro-earthquake (rock burst) that occurred in the area of the city of Severouralsk, Sverdlovsk region. The time in the source according to GMT is 2017-11-01, 14:56:48, latitude 60.2° N, longitude 60.0° E, duration magnitude $M_d = 2,4$. Seismograms were obtained at the temporary observation point “V. Sysert”: latitude 56.44° N, longitude 60.72° E (displacement rate record). Recording components: Z – vertical, N–S and E–W – horizontal north-south and east-west. P, S, L are the first arrivals of P, S and surface waves

му времени). Эпицентр землетрясения находился в 25 км к северо-западу от г. Качканара. Магнитуда землетрясения составила $M_L = 4,4$ ($M_S = 3,9$), глубина очага $h = 10$ км, интенсивность в эпицентре 4–5 баллов по шкале MSK-64. Землетрясение ощущалось в нескольких ближайших населенных пунктах в радиусе 40–50 км. Согласно результатам опроса жителей, выполненного сотрудниками ГИ УрО РАН и ФИЦ ЕГС РАН, данное событие вызвало большой обществен-

ный резонанс и тревогу среди населения. Все люди, ощущавшие землетрясение, сначала чувствовали прохождение звуковой волны – «раскат грома», «как от взрыва», затем задрезбужали стекла, «пошла нарастающая вибрация», произошло несколько толчков, после которых вибрация стала убывать [13, 14]. Через 10 дней после землетрясения в данном районе имело место еще одно микроземлетрясение с магнитудой $M_L = 2,1$ ($M_S = 1,6$), которое в силу своей пространственно-

Таблица 1. Сводный каталог тектонических землетрясений, зарегистрированных на территории Свердловской области за период 1788–2022 г.**Table 1. Consolidated catalog of tectonic earthquakes recorded in the territory of the Sverdlovsk region for the period 1788–2022**

Дата	Время (GMT)	Широта, с. ш.	Долгота, в. д.	Глубина, км	Магнитуда M_s	Источник
1788	–	57.92	59.96	15	3,0	[4, 10]
1813	–	58.70	59.90	15	3,7	[1, 3–5, 7, 10]
29.11.1832	06:00:00	57.93	59.95	10	3,0	[1, 3–5, 7, 10]
27.04.1847	08:00:00	58.29	59.76	23	4,5	[1, 3–5, 7, 10]
10.07.1892	09:52:00	56.50	60.90	15	4,7	[1, 4, 5, 7, 10]
19.09.1902	17:03:00	57.90	59.30	16	3,5	[1, 3, 5, 7, 10]
17.08.1914	04:57:10	57.09	59.80	26	5,0	[1, 3–8, 10]
13.09.1958	04:39:50	57.20	58.40	35	3,9	[1, 3, 5, 6–8, 10]
21.02.1970	07:09:15	59.40	59.80	14	4,2	[1, 3, 5, 6–8, 10]
20.07.2003	20:33:23.5	56.65	58.65	24	2,0	[2, 6, 8]
04.09.2004	06:25:13	56.65	58.75	10	~ 1,0	[6]
21.09.2005	20:40:21.5	57.35	59.70	10	3,3	[2, 6, 8]
02.02.2006	11:30:21	60.87	61.87	10	2,6	[2]
05.05.2008	14:59:20	56.31	60.16	10	2,3	[8]
08.05.2008	04:42:32	59.89	60.39	10	2,0	[8]
29.03.2010	21:02:11	58.85	59.17	10	3,9	[2, 8]
08.04.2010	17:59:05	58,91	59.04	10	1,6	[2, 9]
27.04.2013	11:32:34	57.88	58.91	23	2,4	[2, 9]
22.02.2014	09:56:11	58.23	59.54	5	2,7	[2, 9]
14.01.2015	20:50:48	58.16	59.71	10	2,4	[2, 9]
29.05.2015	18:41:19	59.74	60.04	1	2,8	[2, 9]
04.07.2015	00:33:35	59.79	60.03	10	2,3	[2, 9]
25.09.2015	18:24:47	59.83	59.96	10	2,1	[2, 9]
18.10.2015	21:44:51	57.13	58.83	12	4,4	[2, 9]
03.01.2016	13:48:53	60.01	59.42	10	2,6	[2, 9]
13.03.2016	02:17:00	58.28	59.54	2	2,3	[2, 9]
16.05.2016	17:19:08	60.00	59.82	10	1,6	[2, 9]
11.03.2017	03:12:42	58.89	59.13	10	2,4	[2, 9]
15.03.2018	22:53:22	60.91	60.26	10	2,4	[2, 9]

временной близости к Качканарскому землетрясению было признано его единственным афтершоком [2, 14].

Событие 18 октября 2015 г. произошло в 21 ч 44 м 51 с по Гринвичу (19 октября, примерно в 4 ч ночи по местному времени). На рис. 4 приведена сейсмограмма этого землетрясения. Эпицентр землетрясения находился в пос. Сабик Шалинского района Свердловской области, приблизительно в 40 км к западу–северо-западу от эпицентра самого сильного на Среднем Урале Билимбаевского землетрясения. Магнитуда землетрясения составила $M_L = 4,7$ ($M_S = 4,4$), глубина очага $h=12$ км, интенсивность в эпицентре 5,0 баллов по шкале MSK-64. Землетрясение ощущалось достаточно отчетливо не только в ближних населенных пунктах, но и на расстоянии более 100 км от эпицентра [2, 15, 16]. Специалистами ГИ УрО РАН и ФИЦ ЕГС РАН был проведен сбор макросейсмических данных [16].

В радиусе 10–20 км от инструментального эпицентра отмечались сильные толчки, звон посуды, тряска стекол в окнах, раскачивание легких предметов, шатание крупной бытовой техники. Многие очевидцы просыпались, выбегали на улицу. Прохождение сейсмических волн сопровождалось шумовыми эффектами. Люди описывали свои ощущения, как «толчок, вибрация, будто снег упал с крыши», «гул, грохот, будто в угол дома въехал грузовик». Граница зоны осязательности данного землетрясения проходила на удалении около 130 км от эпицентра, где были либо слабые, еле ощутимые толчки, либо ничего не ощущалось. На северо-запад от очага ощутимые колебания распространялись заметно дальше, чем в других направлениях. Повреждения зданий и сооружений не выявлены ни в одном из обследованных населенных пунктов. Поскольку сотрясения охватили большинство населенных пунктов Среднего Урала, землетрясение получило название Среднеуральского [15–17].

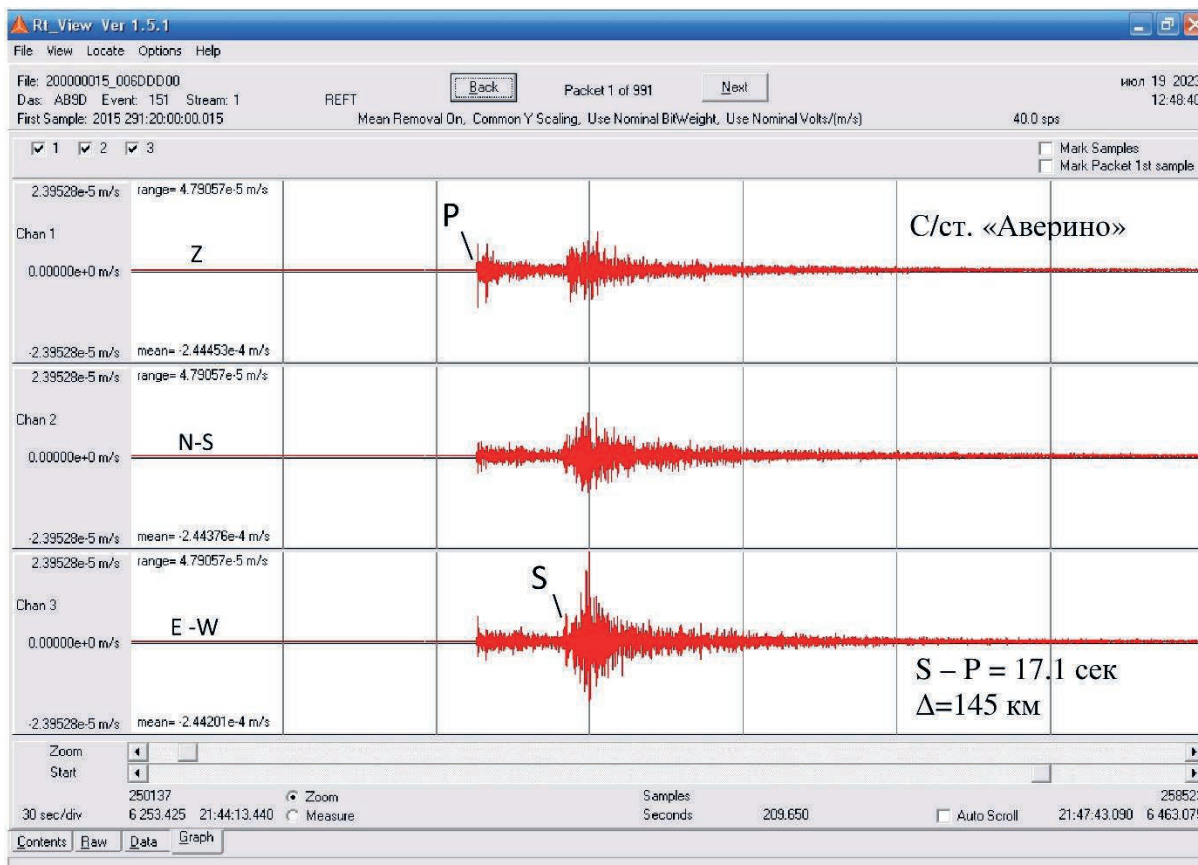


Рисунок 4. Сейсмограмма Среднеуральского землетрясения, произошедшего вблизи пос. Сабик Шалинского района Свердловской области, полученная на временном пункте наблюдения «Аверино»: широта 56.33° N, долгота 61.04° E (запись скорости смещений). Время в очаге по Гринвичу – 2015-10-18, 21:44:51, широта 57.13° N, долгота 58.83° E, магнитуда $M_d = 3,1$ ($M_s = 4,4$) Компоненты записи: Z – вертикальная, N–S и E–W – горизонтальные север–юг и восток–запад. P, S – первые вступления продольных, поперечных волн
Figure 4. Seismogram of the Middle Urals earthquake that occurred near the village. Sabik, Shalinsky district, Sverdlovsk region, obtained at the temporary observation point “Averino”: latitude 56.33° N, longitude 61.04° E (displacement velocity record). Time in the source GMT – 2015-10-18, 21:44:51, latitude 57.13° N, longitude 58.83° E, magnitude $M_d = 3.1$ ($M_s = 4.4$) Record components: Z – vertical, N–S and E–W – horizontal north–south and east–west. P, S – first arrivals of longitudinal, transverse waves

Отдельного внимания заслуживают землетрясения на севере области, в районе городов Ивделя, Красногубинска, Карпинска. Здесь наблюдается увеличение регистрируемых событий, вероятно, тектонической природы. Эпицентры этих, а также многих других землетрясений Свердловской области, располагаются близко к горнодобывающим предприятиям, осуществляющим разработку месторождений полезных ископаемых наземным и подземным способами. Практически везде разработка месторождений ведется буровзрывным способом, что накладывает определенные трудности при определении типа сейсмических явлений в данном районе.

Сравнительный анализ инструментальных записей местных сейсмических событий, зарегистрированных стационарными сейсмическими станциями «Арти», «Свердловск», а также временными передвижными станциями ИГФ УрО РАН, позволил установить преобладание сдвиговых волн и отсутствие поверхностных на записях местных землетрясений. Отношение A_s/A_p на сейсмограммах тектонических событий может достигать 10, в то время как у взрывов это отношение не более 3, у горных ударов – 3–5. Эти характерные особенности позволяют оценивать природу регистрируемых событий [6]. В качестве примера в работе приведены записи сейсмических

событий на пунктах наблюдения «Аверино» и «В. Сысерть» Свердловской области (рис. 3, 4). Сейсмостанции были оснащены регистраторами модели REF ТЕК 130-1 и трехкомпонентными велосиметрами СК-1П и LE-3Dlite Mk III с собственной частотой 1 Гц.

Согласно данным, приведенным в работе [2], анализ волновых форм станций Уральской сети позволил событиям с эпицентрами на территории севера области, указанным в табл. 1, присвоить тектоническую природу. Данных о макросейсмических проявлениях этих землетрясений не имеется.

На диаграмме (рис. 1) видно, что наименьший процентный вклад вносят события метеоритного (импактного) происхождения. За период с 1788 по 2022 г. на исследуемой территории было зафиксировано одно такое событие. Оно произошло 11.09.1841 ($M = 4,1$, координаты эпицентра 57.8° с. ш., 59.7° в. д.) в районе г. Нижнего Тагила (рис. 2). Согласно свидетельствам, опубликованным в местных газетах того времени, ночью жители слышали подземный шум, подобный отдаленному грому, за которым следовал удар землетрясения. Мебель и другие комнатные вещи испытывали легкое сотрясение. Утром небо озарилось ярким розовым светом с отблеском наподобие искр, далее красноватый цвет воздуха переходил в жел-

тый, оранжевый и палевый, сгущавшийся до такой степени, что нельзя было различить близкие предметы. Это явление наблюдали в течение всего дня. Вероятнее всего, наисильнейшие макросейсмические проявления могли быть связаны со взрывом метеорита в воздухе [5, 10].

Кроме разнообразия природы сейсмических событий на рассматриваемой площади данная территория характеризуется сложным геолого-тектоническим строением и геодинамикой, имеющей свои особенности. Вопросы сеймотектоники региона освещены в работах А. Н. Гуляева, В. С. Дружинина, С. Н. Кашубина [7, 18–20]. Ими на основании анализа геолого-геофизических данных выделена Среднеуральская зона повышенной сейсмичности, в пределах которой расположена вся западная часть территории Свердловской области. Восточная граница этой зоны проходит субмеридионально вблизи г. Заречного, г. Алапаевска, с. Романово; западная, северная и южная – за пределами области. Среднеуральская зона повышенной сейсмичности является наиболее сейсмически активным участком Уральского орогена. Ни севернее, ни южнее подобной области концентрации эпицентров ощутимых землетрясений на Урале не имеется.

Наиболее значительной особенностью, которая может оказывать влияние на сейсмическую активность региона, является то, что Восточно-Европейская платформа образует выступ, далеко выдающийся на восток. Уральское горно-складчатое сооружение на данном участке, выгибаясь на восток, охватывает этот выступ, образуя Уфимский амфитеатр, сокращая горизонтальные размеры основных геолого-тектонических подразделений, изменяя свою ориентировку на северо-северо-западное направление по азимуту около 320–330° по сравнению со смежными участками [18]. Эта область сужения была названа в работе [21] областью Центрально-Уральского перережима. В морфологии поверхности мантии в области перережима Южно-Уральский сектор Уральского мантийного трога выглядит смещенным на юго-восток относительно Средне-Северо-Уральского сектора на расстояние около 150 км. Возможно, это связано со сдвиговыми деформациями земной коры [7].

Авторы выражают благодарность В. В. Колмогоровой за консультационную помощь при анализе архивных и инструментальных каталогов сейсмических событий.

Также значительной особенностью территории является существование глубинных разломов, которые проявляют активность и динамическое воздействие в разной степени на всех этапах развития [7, 19, 22–24]. В частности, основная часть наиболее сильных землетрясений приурочена к осевым зонам и ближним зонам геодинамического влияния Главного Уральского и Салатимского разломов, ограничивающих Центрально-Уральское поднятие с востока и запада соответственно.

Выводы

На территории Свердловской области ежегодно регистрируется примерно 400 сейсмических событий. Их анализ показывает, что преобладающими по количеству являются техногенные события – взрывы и горнорудные землетрясения. Они оказывают значительное техногенное воздействие на геологическую среду. Эпицентры техногенных землетрясений сосредоточены вблизи горнодобывающих предприятий. Ощущаются они, как правило, жителями близрасположенных городов и других населенных пунктов в радиусе около первых десятков километров.

Тектонические землетрясения на рассматриваемой территории происходят относительно редко, и их интенсивность не превышает 6 баллов по шкале MSK-64. Большая часть из них не ощущается людьми, но ряд событий, магнитуда которых более 4,0, имеют макросейсмические проявления. Данные землетрясения свидетельствуют об активности современных тектонических процессов в регионе.

В связи с изложенным о наблюдаемой сейсмичности исследуемой территории, об особенностях геолого-тектонических и геодинамических условий региона, а также в соответствии с нормативными требованиями СП 14.13330.2018 и картами Общего сейсмического районирования (ОСР–2015) [25] необходимо учитывать сейсмичность при строительстве объектов повышенной ответственности и особо ответственных объектов на большей части области. Поэтому полученные результаты данной работы послужат основой для определения параметров сейсмического режима, являющегося частью работ по детальному сейсмическому районированию территории Свердловской области.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ананьин И. В. Сейсмологические данные по регионам. XIV. Европейская часть СССР, Урал и Западная Сибирь // Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР (с древнейших времен до 1975 г.) М.: Наука, 1977. С. 465–470.
2. База данных «Землетрясения России». URL: <http://eqru.gsras.ru>
3. Блинова Т. С. Прогноз геодинамически неустойчивых зон. Екатеринбург: УрО РАН, 2003. 162 с.
4. Вейс-Ксенофонтова З. Г., Попов В. В. К вопросу о сейсмической характеристике Урала // Труды Сейсмологич. ин-та АН СССР. Вып. 104. М.: Изд-во АН СССР, 1940. 12 с.
5. Годзиковская А. А. Каталог сейсмических событий Уральского региона с древнейших времен по 2002 г. (сопутствующие первичные материалы). М.: ИФЗ РАН, 2016. 258 с.
6. Дружинин В. С., Колмогорова В. В., Парыгин Г. И., Гуляев А. Н., Никитин С. Н., Пустовалов Н. А., Осипов В. Ю. Глава 3.2. Сейсмичность Урала // Землетрясения и микросейсмичность в задачах современной геодинамики Восточно-Европейской платформы. Кн. 1. Землетрясения / под ред. Н. В. Шарова, А. А. Маловичко, Ю. К. Щукина. Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН, 2007. С. 263–276.
7. Кашубин С. Н., Дружинин В. С., Гуляев А. Н., Кусонский О. А., Ломакин В. С., Маловичко А. А., Никитин С. Н., Парыгин Г. Н., Рыжий Б. П., Уткин В. И. Сейсмичность и сейсмическое районирование Уральского региона. Екатеринбург: УрО РАН, 2001. 124 с.
8. Кусонский О. А. Геофизические обсерваторские исследования на Урале. Екатеринбург: РИО УрО РАН, 2012. 280 с.
9. Сейсмологический мониторинг Западного Урала. URL: http://pts.mi-perm.ru/mlp/?page_id=727&php=tcant
10. Землетрясения Урала и сильнейшие землетрясения прилегающих территорий Западной Сибири и Восточно-Европейской платформы / В. В. Степанов [и др.]. М.: ЦСГНЭО, 2002. 135 с.
11. Адушкин В. В. Тектонические землетрясения техногенного происхождения // Физика Земли. 2016. № 2. С. 22–44.

12. Маловичко А. А., Морозов А. Н., Ваганова Н. В., Асминг В. Э., Дягилев Р. А., Евтюгина З. А. Билимбаевское землетрясение 17 августа 1914 г.: параметры гипоцентра по инструментальным данным // Российский сейсмологический журнал. 2020. Т. 2. № 1. С. 40–47. <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2020.1.04>
13. Верховланцев Ф. Г., Дягилев Р. А. Качканарское землетрясение 29 марта 2010 г. Макросейсмические проявления // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: материалы V Междунар. сейсмологич. школы. Обнинск: ГС РАН, 2010. С. 46–55.
14. Дягилев Р. А., Голубева И. В. Параметры Качканарского землетрясения 29 марта 2010 г. по инструментальным данным // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: материалы V Междунар. сейсмологич. школы. Обнинск: ГС РАН, 2010. С. 89–93.
15. Верховланцев Ф. Г., Габсатарова И. П., Гусева Н. С., Дягилев Р. А. Среднеуральское землетрясение 18 октября 2015 г. $M_L = 4.7$, $I_0 = 6$ баллов // Землетрясения Северной Евразии. 2021. Вып. 24 (2015 г.). С. 314–323. <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2021.24.30>
16. Гусева Н. С., Дягилев Р. А., Верховланцев Ф. Г. Макросейсмическое поле Среднеуральского землетрясения 18 октября 2015 г. // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: материалы XI Междунар. сейсмологич. школы. Обнинск: ГС РАН, 2016. С. 125–129.
17. Дягилев Р. А., Гусева Н. С., Верховланцев Ф. Г. Анизотропия макросейсмического поля Среднеуральского землетрясения 18 октября 2015 года // Геофизика. 2016. № 5. С. 42–46.
18. Гуляев А. Н. К вопросу о сейсмостектонике центральной части Уральского региона // Архитектон: известия вузов. 2010. № 1(29). URL: http://archvuz.ru/2010_1/12/
19. Дружинин В. С., Осипов В. Ю. Сейсмостектоника Северного, Среднего Урала и прилегающих районов Восточно-Европейской платформы // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2018. № 1. С. 21–34. <https://www.elibrary.ru/qvaqyg>
20. Guliaev A. N. Seismotectonics of the Urals // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal. 2019. No. 1. P. 42–51. <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2019-1-42-51>
21. Копп М. Л. Мобилистическая неотектоника платформ Юго-Восточной Европы. М.: Наука, 2005. 339 с.
22. Дружинин В. С., Каретин Ю. С., Дьяконова А. Г., Кашубин С. Н., Кашубина Т. В., Колмогорова В. В., Кухмазов С. У., Парыгин Г. И., Осипов В. Ю. Комплексные геофизические исследования литосферы Среднего Урала по Артинскому профилю // Отечественная геология. 2003. № 1. С. 65–73.
23. Friberg M., Juhlin S., Beckholmen M., Petrov G. A., Green A. G. Palaeozoic tectonic evolution of the Middle Urals in the light of the ESRU seismic experiments // Journal of the Geological Society, London. 2002. Vol. 159. P. 295–306. <https://doi.org/10.1144/0016-764900-189>
24. Ryzhiy B. P., Druzhinin V. S., Yunusov F. F., Ananyin I. V. Deep structure of the Urals region and its seismicity // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 1992. Vol. 75. Issue 1–3. P. 185–191. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(92\)90129-J](https://doi.org/10.1016/0031-9201(92)90129-J)
25. Свод правил СП 14.13330.2018. Строительство в сейсмичных районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81*. М.: Минстрой России. Дата введения 2018-11-25.

Статья поступила в редакцию 20 июня 2023 года

Seismic events in the Sverdlovsk region for the period 1788–2022

Anastasiya Yur'evna OSIPOVA*
Vyacheslav Yur'evich OSIPOV**
Gennadiy Ivanovich PARYGIN***

Bulashevich Institute of Geophysics of the Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russia

Abstract

Introduction. Sverdlovsk region is a major industrial center. There are mining enterprises, chemical plants, reservoirs, and high-capacity power plants. These objects are located close to large settlements. Currently, about 400 seismic events are recorded annually in the region. To ensure the seismic safety of objects of increased responsibility and especially important construction objects, it is necessary to carry out studies on detailed seismic zoning of the territory under consideration. The results of this work are the first stage of these studies.

Research theory. For the first time, a consolidated unified catalog of seismic events that occurred on the territory of the Sverdlovsk region was compiled. Historical and instrumental catalog data for the period 1788–2022 and data from instrumental records of local seismic events recorded by temporary, mobile stations of the Institute of Geophysics Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (IGF UB RAS) served as the basis.

Results. Most of the recorded events are technogenic. Mostly these are industrial explosions and rock burst. These seismic events are recorded in the area of the following cities: Asbest, Ekaterinburg, Revda, Nizhny Tagil, Kushva, Kachkanar, Karpinsk, Severouralsk. Tectonic earthquakes have also been repeatedly recorded in the Sverdlovsk region. Most of them are not felt by people. Earthquakes with a magnitude greater than 4.0 have macroseismic manifestations. The strongest earthquake is 08.17.1914 ($M_s = 5.0$, epicenter coordinates 57.09° N, 59.8° E). The intensity of the earthquake at the epicenter was 6.0 on the MSK-64 scale. The results of this work will serve as a basis for further determination of the parameters of the seismic regime of the study area.

Keywords: catalog of seismic events, Sverdlovsk region, seismicity, earthquakes, detailed seismic zoning

The authors express their gratitude to V. V. Kolmogorova for her consulting assistance in the analysis of archival and instrumental catalogs of seismic events.

REFERENCES

- Ananyin I. V. 1977, Seismological data by region. XIV. The European part of the USSR, the Urals and Western Siberia. New catalog of strong earthquakes on the territory of the USSR. Moscow, pp. 465–470. (In Russ.)
- Russian Earthquakes Database. (In Russ.) URL: <http://eqru.gsras.ru>
- Blinova T. S. 2003, Forecast of geodynamically unstable zones. Yekaterinburg, 162 p. (In Russ.)
- Weiss-Ksenofontova Z. G., Popov V. V. 1940, On the issue of seismic characteristics of the Urals. *Trudy Seismologicheskogo instituta Akademii Nauk SSSR* [Proceedings of the Seismological Institute of the USSR Academy of Sciences], issue 104. Moscow, 12 p. (In Russ.)
- Godzikovskaya A. A. 2016, Catalog of seismic events in the Ural region from ancient times to 2002. Moscow, 258 p. (In Russ.)
- Druzhinin V. S., Kolmogorova V. V., Parygin G. I., Gulyaev A. N., Nikitin S. N., Pustovalov N. A., Osipov V. Yu. 2007, Chapter 3.2. Seismicity of the Urals. Earthquakes and microseismicity in problems of modern geodynamics of the East European Platform. Book 1. Earthquakes. Petrozavodsk, pp. 263–276. (In Russ.)
- Kashubin S. N., Druzhinin V. S., Gulyaev A. N., Kusonsky O. A., Lomakin V. S., Malovichko A. A., Nikitin S. N., Parygin G. N., Ryzhy B. P., Utkin V. I. 2001, Seismicity and seismic zoning of the Ural region. Yekaterinburg, pp. 124 c. (In Russ.)
- Kusonsky O. A. 2012, Geophysical observatory research in the Urals. Yekaterinburg, pp. 280 c. (In Russ.)
- Seismological monitoring of the Western Urals. (In Russ.) URL: http://pts.mi-perm.ru/mlp/?page_id=727&php=tcac
- Stepanov V. V. [et al.]. 2002, Earthquakes of the Urals and the strongest earthquakes of the adjacent territories of Western Siberia and the East European Platform. Moscow, 135 p. (In Russ.)
- Adushkin V. V. 2016, Tectonic earthquakes of technogenic origin. *Fizika Zemli* [Physics of the Earth], no. 2, pp. 22–44. (In Russ.)
- Malovichko A. A., Morozov A. N., Vaganova N. V., Asming V. E., Dyagilev R. A., Evtyugina Z. A. 2020, Bilimbaev earthquake of August 17, 1914: hypocenter parameters according to instrumental data. *Rossiyskiy seismologicheskii zhurnal* [Russian Seismological Journal], vol. 2, no. 1, pp. 40–47. (In Russ.) <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2020.1.04>
- Verkholantsev F. G., Dyagilev R. A. 2010, Kachkanar earthquake of March 29, 2010 Macroseismic manifestations. Modern methods of processing and interpretation of seismological data: materials of the V International seismological school. Obninsk, pp. 46–55. (In Russ.)
- Dyagilev R. A., Golubeva I. V. Parameters of the Kachkanar earthquake of March 29, 2010 according to instrumental data. Modern methods of processing and interpretation of seismological data: materials of the V International seismological school. Obninsk, pp. 89–93. (In Russ.)
- Verkholantsev F. G., Gabsatarova I. P., Guseva N. S., Dyagilev R. A. 2021, Mid-Ural earthquake of October 18, 2015. $M_L = 4.7$, $I_0 = 6$ points. *Zemletryaseniya Severnoy Yevrazii* [Earthquakes of Northern Eurasia], issue 24, pp. 314–323. (In Russ.) <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2021.24.30>

✉ seismolab@mail.ru

**igf_us@mail.ru

***usc_gena@mail.ru

16. Guseva N. S., Dyagilev R. A., Verkholtantsev F. G. 2016, Macroseismic field of the Middle Urals earthquake of October 18, 2015. Modern methods of processing and interpretation of seismological data: materials of the XI International seismological school. Obninsk, pp. 125–129. (*In Russ.*)
17. Dyagilev R. A., Guseva N. S., Verkholtantsev F. G. 2016, Anisotropy of the macroseismic field of the Middle Urals earthquake of October 18, 2015. *Geofizika* [Geophysics], no. 5, pp. 42–46. (*In Russ.*)
18. Gulyaev A. N. 2010, To the question of seismotectonics of the central part of the Ural region. *Arkhitekton* [Architecton], no. 1 (29). (*In Russ.*) URL: http://archvuz.ru/2010_1/12/
19. Druzhinin V. S., Osipov V. Yu. 2018, Seismotectonics of the Northern, Middle Urals and adjacent areas of the East European Platform. *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya* [Geoecology. Engineering geology, hydrogeology, geocryology], no. 1, pp. 21–34. (*In Russ.*) <https://www.elibrary.ru/qvaqyg>
20. Guliaev A. N. 2019, Seismotectonics of the Urals. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal* [News of the higher educational institutions. Mining journal], no. 1, pp. 42–51. (*In Russ.*) <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2019-1-42-51>
21. Kopp M. L. 2005, Mobilistic neotectonics of the platforms of South-Eastern Europe. Moscow, 339 p. (*In Russ.*)
22. Druzhinin V. S., Karetin Yu. S., Dyakonova A. G., Kashubin S. N., Kashubina T. V., Kolmogorova V. V., Kukhmazov S. U., Parygin G. I., Osipov V. Yu. 2003, Complex geophysical studies of the lithosphere of the Middle Urals along the Artinsky profile. *Otechestvennaya geologiya* [Domestic geology], no. 1, pp. 65–73. (*In Russ.*)
23. Friberg M., Juhlin C., Beckholmen M., Petrov G. A., Green A. G. 2002, Palaeozoic tectonic evolution of the Middle Urals in the light of the ESRU seismic experiments. *Journal of the Geological Society*, London, vol. 159, pp. 295–306. <https://doi.org/10.1144/0016-764900-189>
24. Ryzhiy B. P., Druzhinin V. S., Yunusov F. F., Ananyin I. V. 1992, Deep structure of the Urals region and its seismicity. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, vol. 75, issue 1–3, pp. 185–191. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(92\)90129-J](https://doi.org/10.1016/0031-9201(92)90129-J)
25. Set of rules SR 14.13330.2018. Construction in seismic areas. Updated version of Construction Norms and Regulations II-7-81*. Moscow. (*In Russ.*)

The article was received on June 20, 2023

Экономические науки

Economic sciences

UDC 669.01

<http://doi.org/10.21440/2307-2091-2023-4-137-145>

Problems complicating the introduction of technogenic deposits into economic circulation

Margarita Nikolaevna IGNAT'EVA^{1,2*}Vladimir Evgen'evich STROVSKIY^{1*}Oksana Aleksandrovna LOGVINENKO¹Oksana Gennad'evna KOMAROVA¹¹Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia²Institute of Economics of the Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russia

Abstract

Relevance. In modern conditions of depletion of the mineral resource base, deterioration of natural conditions of newly discovered deposits, the development of technogenic mineral resources gains primary importance. However, as the analysis shows, the level of use of solid mineral formations continues to remain insignificant.

The purpose of the study is to identify the reasons that slow down the process of involving technogenic deposits into economic circulation, in order to prevent their occurrence or mitigate negative impacts.

Research methods. In the research process, methods of comparative analysis, analogies, and expert analysis were used.

Results. Analysis and generalization of domestic and foreign experience in the management of technogenic mineral formations (TMFs) allowed us to identify the main reasons hindering the expansion of the practice of developing technogenic deposits. Nine reasons were identified: imperfection of the regulatory framework for the management of TMFs, low degree of geological knowledge, high geological risk, lack of waste processing technologies, lack of necessary financial resources, imperfection of the economic mechanism used by the state in regulating waste management activities, the possibility of extending shelf life of TMFs, imperfect availability of information about TMFs, lack of qualified personnel. As a result of an expert survey of 20 specialists, the identified reasons were ranked and the highest priorities were identified. These included: the imperfection of the regulatory framework, the lack of environmentally friendly technologies required and the lack of an effective economic mechanism for state regulation of this activity.

Conclusions. Identification of the primary reasons slowing down the process of development of technogenic deposits determines the further direction of work to prevent them or mitigate negative impacts.

Keywords: technogenic deposits, problems, development, priority, ranking of problems.

Introduction

The accumulation of technogenic mineral formations began in Russia from the moment the first state-owned factories appeared. According to data [1], the appearance of the first mining plants dates back to the 1630s, including the first most ancient formation of a dump with a volume of about 1 thousand m³ and a height of 2m [2]. During those years, the Pyskorsky copper smelter began operating on the western slope of the Urals, which was accompanied by the accumulation of slag. Since the beginning of the 18th century, the Urals have become a major center of mining and metallurgy, and the intensive exploitation of mineral resources leads to the accumulation of waste. Waste rock is used to fill mined-out space, waste copper ores are processed, for which a hydrometallurgical plant was

built on the basis of the Gumeshevsky mine in 1907. These are the first examples of the development of technogenic deposits.

The formation of TMFs dates back to the beginning of the 20th century. They constantly attract attention as promising sources of raw materials, and therefore, since the 30s, attempts have been made to study and evaluate them, which is confirmed by the surviving materials of these works. In 1931–1937 dumps of the Turyinsky copper mines were assessed for Cu and Co slags of the Bogoslovsky copper smelter, and in 1941 for slags of the Vyysky copper smelter. In 1934 and 1937–1938 an assessment of copper-containing waste from most copper enterprises in the Urals was carried out during geological exploration. The study of waste from the copper sub-industry in

✉rinis@mail.ru

 <http://orcid.org/0000-0001-9014-905X>

**ief.etp@m.ursmu.ru

 <http://orcid.org/0000-0001-6898-4286>

the Urals continued in the 50s, as well as in the 70–80s [3]. In the 70–80s geological exploration work was carried out to assess copper-containing waste from large copper smelters in the Urals.

The problem of the development of technogenic deposits (TGs) has become noticeable in 1986, when resolution No. 56 by the State Committee for Science and Technology of the USSR dated March 14, 1986 was issued, “Creation of scientific foundations and methods for increasing the efficiency of rational integrated development mineral deposits and subsoil protection for 1986–1990 and for the period up to 2000” [4]. The research tasks included the following: development of an inventory, geological assessment of the composition of existing heavy metals, development of ore processing technologies and promising heavy metals, development of effective methods for the development of heavy metals, economic assessment of the development of heavy metals, development of standard requirements for rules and regulations for designing the development of heavy metals. Resolution No. 56 was the impetus for intensifying activities on the study, assessment and development of TMs. Attention to this problem varied, but over time the problem became a national priority.

The problem of developing heavy metals is still quite acute today, which is associated with the depletion of the mineral resource base and the need to expand it and mitigate the threat of loss of stability. The second aspect is increasing the level of environmental safety by neutralizing sources of negative impact on the environment represented by TMFs. According to the specialists of the All-Russian Research Institute of Economy and Exploration of Mineral Resources, over 300 years of operation of the mining industry in Russia, about 100 billion tons of TMFs have been accumulated, which occupy large areas in the Central, Northern, Ural, Western and East Siberian regions. It is believed that 40 billion tons of them are suitable for the production of building materials. The largest share (up to 40% by weight) belongs to the TMFs of the coal series. According to [5], about 2 billion tons of technogenic coal-containing raw materials are concentrated in large coal-mining regions of Russia alone. Concentrations of TMFs and ore useful components are significant. Thus, the TMFs of non-ferrous metallurgy contain in thousand tons: copper – 7790, lead – 980, zinc – 9000, tin – 540, nickel – 2480, tungsten – 129, molybdenum – 114, lithium – 97, etc. The dumps of gold mines contain about 5 thousand tons of gold [6]. Despite the presence of such rich technogenic mineral potential, its development remains unsatisfactory. The accumulated volumes of TMFs are growing, as is their shelf life, which significantly reduces the quality characteristics of the latter, turning them into “metal trash.”

Results

Despite all the power of the technogenic mineral potential, its use remains insignificant. Identification of the reasons inhibiting this process will make it possible to develop a set of measures to prevent their occurrence or mitigate possible negative impacts.

Analysis of the state of waste management in domestic and foreign practice made it possible to identify the main problems. The first of them includes the imperfection of the regulatory framework regarding waste management, including mineral technogenic formations. It is contradictory and does not distinguish TMFs into a separate category of legal

regulation. Technogenic deposits are equal to natural deposits in terms of exploration, licensing, and approval of reserves. Hence, to transfer TMFs into a technogenic deposit, the subsoil user must:

- submit an application for a competition, prepare a technical specification, participate in the competition, obtain a license that gives the right to carry out a certain set of works, determines the boundaries of the subsoil plot and the timing of the work. When holding an auction, make a one-time payment;

- prepare a project for geological exploration work (agreed with the authorities of the Federal State Institution Rosgeolpertzta);

- carry out geological exploration work, based on the results of which a feasibility study of conditions is compiled, a state examination is carried out and standards for calculating reserves are approved (according to the Decree of the Government of the Russian Federation dated January 22, 2007, No. 37);

- calculate mineral reserves according to approved standards, perform a state examination of reserve calculations in order to put them on the state balance sheet [7];

- develop a project for working out the reserves of a technogenic deposit, conduct a state environmental examination and an industrial safety examination, pass the project after its approval by the Central Territorial Commission for Development;

- develop the field in accordance with the approved project with annual approval of loss standards;

- upon completion of field development, carry out reclamation work in accordance with the reclamation project.

A critical condition for the transfer of TMFs into technogenic deposits is the state examination of mineral reserves, confirming the feasibility of developing a technogenic deposit, which is reflected in the State Reserves Committee/Territorial Committee for Natural Reserves protocol. Only after a positive decision by the State Reserves Committee/Territorial Committee for Natural Reserves can a man-made deposit be provided for use. Carrying out the above list of works turns out to be impossible if all the necessary formalities are followed.

Firstly, the state examination of reserves is based on approved regulatory documents, in which such objects as man-made mineral formations and man-made deposits are absent. The entire regulatory framework concerns natural deposits of the period of the 70–80s, when the problem of developing technogenic mineral resource potential remained irrelevant.

Secondly, there are practically no methodological recommendations on the organization of geological exploration work. The by-law approved by the State Reserves Committee Rosnedra in 1994 “Methodological recommendations for the study and environmental and economic assessment of technogenic deposits” is illegitimate. In fact, it cannot be used for practical purposes, and also cannot serve as a basis for the examination of geological exploration projects, and, consequently, for justifying conditions and calculating reserves.

Thirdly, according to experts, the recommended methods for exploration of technogenic deposits cannot provide a reliable assessment of reserves and their distribution within the boundaries of the deposit. Particularly difficult is the assessment of reserves of technogenic placers, which, according to A. G. Chernyavsky are even more complex than group IV

deposits, and therefore “gold resources... will never become reserves” [8], the necessary information for transfer to reserves is missing and cannot be obtained. The effectiveness of the recommended method for determining the efficiency of mining technogenic placers (sampling of large volumes with washing them on an industrial device), as the author himself believes, is close to zero; there are no patterns in the presence of gold at the site. This indicates the impossibility of reliably assessing reserves in order to put them on the state balance sheet. Fourthly, there is little experience in the development of technogenic placers, which allows us to formulate only preliminary recommendations. Thus, fulfilling the established procedure for transferring TMFs to technogenic deposits turns out to be impossible.

The listed conditions for solving the problem of calculating reserves and their approval by State Reserves Committee/Territorial Committee for Natural Reserves significantly complicate the process of possible development of man-made deposits, primarily due to a significant increase in the cost of development of man-made deposits (when performing geological exploration work). The development process also increases the cost of making a one-time payment subject to bidding in the form of an auction. In practice, the calculation of a one-time payment is carried out under conditions of unreliable information about the forecast resources of a technogenic deposit and, accordingly, about its capacity in relation to the extraction of minerals. The criticality of making a one-time payment confirms the sensitivity of net present value to changes in its value, which is proven by the example of the Allarechen copper-nickel deposit in work [8]. The subjectivity of determining one-time payments is noted in his work [9] and E. I. Panfilov.

The second aspect is the extension of the period of commissioning of a technogenic deposit, the negative nature of which is reflected in the work of I. V. Epstein [10]. Due to the transfer of cash flows to a later date, there is a decrease in income for both the subsoil user and the state in the form of a decrease in the amount of contributions to the state budget. An extension of the period of commissioning of a technogenic deposit also occurs in the case when the subsoil use object belongs to subsoil plots of federal significance (indigenous gold reserves from 50 tons, copper reserves from 500 thousand tons, deposits are located on land plots from the defense and security lands). In these cases, the subsoil user is forced to communicate with federal structures, and not with regional ones. The terms and approval procedures are being increased due to their increasing complexity.

A big obstacle to the development of technogenic deposits is the lack of necessary technologies or their inaccessibility for a number of subsoil users due to their high cost. The lack of technologies for processing technogenic mineral raw materials or the need to improve existing ones requires R&D, although, as the authors note [11], of the known about 60 technological solutions for the use of technogenic mineral resources for production, only one third is used, and two thirds remain only potential opportunities. Large mining companies usually do not finance technological developments, since the development of technogenic deposits is not in their interests, while small and medium-sized companies do not have enough funds for this. New innovative technologies are very expensive and their use often makes the development of technogenic deposits un-

profitable. It is also necessary to take into account the fact that when developing such deposits, the use of the best available technologies (BAT) is required in accordance with the Federal Law of the Russian Federation No. 219-FZ of July 21, 2014 “On amendments to the Federal Law “On Environmental Protection” and certain legislative acts of the Russian Federation “ The law defines BAT as “a set of production processes, equipment, technical methods, techniques and means used for the production of products at facilities that have a negative impact on the environment, based on modern achievements of science and technology, with the best combination of indicators for achieving environmental protection goals and economic efficiency, subject to the technical feasibility of their use” [9].

Reasonable criteria for determining BAT include [12]:

- the lowest level of negative impact on the environment per unit of time or volume of products produced;
- economic efficiency of implementation and operation;
- application of resource- and energy-saving methods;
- implementation period;
- industrial implementation at two or more facilities that have a negative impact on the environment.

Technologies used in the development of technogenic deposits must have technological standards that do not exceed the technological standards of the best available technologies. Providing information about BAT is carried out through the development and publication of special documents - information and technical reference books, which Federal Law No. 162-FZ of June 29, 2015 “On standardization in the Russian Federation” classifies as documents in the field of standardization. The legislation provides for a number of incentive measures for enterprises implementing BAT (exemption from payments for negative impacts on the environment, subsidized loans, tax reduction, etc.).

It is important to note that in Russia there are examples of effective development of technogenic deposits using domestic technologies. In recent years, bacterial-chemical leaching of sulfide ores, which is based on the ability of certain types of microorganisms to dissolve ore minerals, has become quite widely developed. This technology makes it possible to extract a complex of valuable components not only from ores, but also from enrichment and metallurgical wastes. A positive aspect is the environmental safety of the latter, which excludes emissions of sulfur sulfides, arsenic and sulfur compounds into the atmosphere, as well as the production of sulfuric acid naturally [13–15]. Bacterial leaching is successfully used for leaching rare valuable microelements from waste rocks of coal mining, and is also a source of leaching with sulfuric acid (leaching efficiency for aluminum is 8.91 g/100 g of rock, for gallium and germanium, respectively, 2 and 1.5 mg/1 kg of rock [16, 17]. Close to bacterial leaching is chemical leaching, in which sulfide ores are treated with acid solutions under normal conditions at elevated temperature and pressure [18]. Comparison of these methods in relation to the leaching of copper and zinc from flotation enrichment waste of sulfide ores of mining and processing plants of Southern Urals showed the advantage of bacteriological leaching, which allows for deeper processing of waste at a temperature of 30°C and normal pressure.

To process apatite-baddeleyite waste in the conditions of OAO Kovdorsky MPP, magnetic flotation-gravity technology is used, which makes it possible to obtain iron ore apatite and

baddelite concentrates. To process waste from the enrichment of ferruginous quartzites of the Zaimandrovskaya group of deposits, gravitational-magnetic technology has been developed and used, providing hematite concentrate and a quartz product. To process waste from the enrichment of apatite-nepheline ores, ОАО Apatit has developed a technology based on optimizing the parameters of its preparation for enrichment and the use of new reagent modes and flotation cycle schemes for the separation of mineral complexes. With the introduction of this technology, it became possible to obtain apatite concentrate, nepheline, sphene and titanomagnetite concentrates [19].

To use pyrrhotite tailings, the Norilsk plant uses an innovative technology that involves irradiating technogenic raw materials with powerful nanosecond electromagnetic pulses (PNEMP), which makes it possible to create breakdown channels to metal inclusions, through which leaching solutions gain access to particles of gold and other precious metals. Methods have been developed for selective flocculation of fine particles followed by flotation separation of the resulting flocs or their sedimentation. The most important condition for the selective flocculation of non-ferrous metal sulfides is the use of natural hydrophobicity or that imparted to minerals using collecting reagents. There are positive examples of the use of technologies for processing technogenic mineral resources, but they are few in number. Moreover, often the results of laboratory and pilot-industrial research do not reach mass production due to extremely high costs, which ultimately results in the unprofitability of the development of technogenic deposits.

The development of technogenic deposits is also hampered by the real possibility of extending the storage life of TMFs, which leads to their transition to “stale” waste and loss of use value. During long-term storage, mineral destruction, oxidation, segregation (in tailing dumps by height), and sorption of particles of chemical compounds and flotation reagents on the surface of tailing dumps occur. Useful components are washed out from the dumps and eroded with atmospheric flows. Under the influence of weathering and hydrochemical oxidation, the dump material gradually becomes crushed and becomes difficult to remove [20, 21]. The physical and mechanical properties of rocks also change. Thus, studies have shown a deterioration in the strength characteristics of overburden rocks: with a storage period in dumps of up to 15–20 years, the crushability of crushed stone varies from 800 to 600–800, with a storage period of up to 20–25 years – from 400–600 to 200–400.

The lengthening of storage periods is facilitated by the lack of technologies for the use of technogenic deposits or the lack of funds for their acquisition, as well as numerous administrative barriers in the process of approving documents, approving reserves and placing them on the State Balance Sheet. The process of obtaining a license and the right to use a technogenic deposit can last for more than one year. S. G. Seleznev, who deals with the problem of waste management, especially emphasizes the inflationary nature of reserves of technogenic deposits and expresses concern about the prevailing opinion about the suitability of the latter for processing [21].

Given the current amount of accumulated TMFs, the geological knowledge of most of them is clearly insufficient for making investment decisions regarding the development of technogenic deposits. For large mining companies, TMFs are

not of interest due to their small volumes, so they do not engage in geological study of the latter. Small and medium-sized companies most often do not have sufficient financial resources to obtain the right to use TMFs. The state that should engage in geological research, including “stale waste” is in no hurry to join this process. According to researchers, the most appropriate way to solve the problem of insufficient knowledge of the subsoil is to finance the entire volume of geological exploration work at the expense of the state. In this case, compensation for the costs of geological exploration can be carried out through a tax deduction. Its implementation is possible by reducing the production tax or income tax. Some experts even propose to abolish the mineral extraction tax for the development of technogenic deposits. A similar approach to reducing the size of the extraction tax already takes place in the coal industry, where the deduction from the mineral extraction tax corresponds to the costs of ensuring industrial safety in mines incurred by subsoil users.

The information aspect of this activity continues to hinder the intensification of the process of development of technogenic deposits. Lack of information about existing man-made objects, lack of a unified information base containing complete information about TMFs, including “stale” waste. Some information is contained in the State Cadaster of Mineral Deposits and Occurrences, as well as in the State Cadaster of Wastes. The Deposit Cadaster does not include information about some of the mining waste from existing enterprises, and even more so about “stale” waste for which there is no examination of reserves. In turn, the waste inventory does not imply accounting for useful components contained in TMFs; it mostly contains information about TMFs from an environmental point of view. As a result, the available information is characterized by incomplete data on TMFs, which is not updated in a timely manner and does not meet modern requirements.

A certain disadvantage of the information in the Cadaster about technogenic deposits is that it is not only insufficient, but also not addressed to anyone in particular and therefore most often does not contain such characteristics as:

- full costs of accumulation (placement) of TMFs at enterprises;
- preservation of the potential value of TMFs as a secondary raw material that is not yet in demand;
- methods and results of independent verification of the accuracy of information displayed in cadasters, etc.

The content of regional waste cadasters is not the same; the number and characteristics of classification criteria differ from each other.

The process of using waste is also hampered by the high geological risk associated with the non-confirmation of reserves of technogenic deposits due to the absence of any patterns in the distribution of useful components, high subjectivity when extrapolating data and turning to analogues. As mentioned earlier, there are still no approved regulations for the study of technogenic deposits. A by-law normative act approved by the State Reserves Committee of the Russian Federation, which solves to a certain extent this problem, is illegitimate. The range of opinions even concerns the number of identified groups according to the complexity of the geological structure. The experience in developing technogenic deposits is small, which does not allow us to formulate more or less re-

Table 1. Results of the expert survey**Таблица 1. Результаты опроса экспертов**

Expert	Imperfection of the regulatory framework	Lack of technologies for processing TMFs	Extending the shelf life of TMFs	Low degree of geological knowledge of TMFs	Lack of awareness about TMFs	Lack of own funds	Lack of qualified personnel	High geological risk	Lack of benefits and preferences for using TMFs
1	10	9	6	7	6	6	4	7	8
2	10	6	8	6	4	7	5	4	9
3	10	8	6	6	6	7	4	5	9
4	10	9	6	8	4	7	7	6	8
5	9	8	7	6	6	6	4	5	10
6	10	8	6	7	4	6	5	5	9
7	9	7	8	5	6	7	6	7	10
8	9	8	6	6	5	7	7	6	10
9	10	6	7	6	6	6	4	5	9
10	10	8	6	6	5	7	4	7	9
11	9	8	7	6	5	6	5	5	10
12	10	9	6	7	4	8	7	6	8
13	10	8	6	6	5	7	4	7	9
14	9	8	6	9	4	7	4	7	10
15	10	7	6	5	5	6	5	5	9
16	10	8	6	6	5	7	5	5	9
17	9	8	6	5	4	7	6	4	10
18	10	7	8	6	3	6	4	5	9
19	9	8	7	5	4	6	6	6	10
20	10	7	6	5	5	8	5	7	9
Average	9,65	7,75	6,5	6,15	4,8	6,7	5,05	5,7	9,2

liable recommendations for the organization of geological exploration work, as a result of which relatively reliable reserves can be approved, reflected in the State Balance Sheet.

The limiting factor is the lack of funds among subsoil users for carrying out geological exploration, preparing the necessary documents, conducting examinations and approvals, making a one-time payment, etc., the lack of adequate support from the state in the form of tax benefits, interest-free loans, direct participation of the state in activities related to the management of TMFs, etc. even if a significant economic effect is obtained from the development of technogenic deposits. According to [8], support for innovative projects, which includes projects for the development of technogenic deposits, should be provided by state development institutions, since technologies associated with the extraction and processing of technogenic mineral raw materials are innovative in nature. Financial development institutions include: the Fund for Assistance to the Development of Small Enterprises in the Scientific and Technical Sphere (Bortnik Fund, Assistance Fund), the Development Fund of the Center for the Development and Commercialization of New Technologies (Skolkovo Fund), and the Industrial Development Fund. Supporting the innovation process with the help of development institutions, including improving technologies for the extraction and processing of technogenic mineral raw materials is a worldwide practice.

Table 2. Ranking of problems**Таблица 2. Ранжирование проблем**

Problem	Problem rank
Imperfection of the regulatory framework	1
No benefits or preferences for using TMFs	2
Lack of technologies for processing TMFs	3
Lack of own funds	4
Extending the shelf life of TMFs	5
Low degree of geological knowledge of TMFs	6
High geological risk	7
Lack of qualified personnel	8
Lack of awareness about TMFs	9

A certain obstacle to the development of TMFs is the lack of qualified personnel required to carry out geological exploration, draw up feasibility studies and projects for the development of technogenic deposits, and calculate reserves. Today, the prestige of the geologist's profession has come to naught due to the loss of priority importance of the geological service at the state level, with a reduction in state participation in the development of the mineral resources sector. There is no reserve of professional geologists trained to work in government bodies, the quality of training of specialists has decreased to a critical level, the intellectual

Table 3. The main benefits of the state and business in the implementation of the development of public-private partnerships in the field of waste recycling

Таблица 3. Основные выгоды государства и бизнеса в реализации развития государственно-частного партнерства в сфере переработки отходов

For the state	For business
Solving the problem of waste recycling, reducing the risk of environmental pollution	A private company receives state assets for long-term ownership and use, primarily land plots and their infrastructure support, including on preferential terms
Shifting to business the costs of investing in waste processing projects, maintaining abandoned waste disposal facilities and operating infrastructure facilities for storing and processing waste	Minimizing risks. State support in various forms. Reducing the costs of disposing of your own waste
New sources of investment in waste recycling are emerging	Opportunity to increase the sustainability of companies in the face of declining demand in the core area of private business
The likelihood of quickly achieving results increases (the private investor is focused on obtaining maximum profits in the shortest possible time)	Demonstration of social responsibility and consideration of the environmental interests of the main stakeholders represented by the state and local community
The most effective technologies and innovative approaches to integrated low-waste waste processing with the extraction of minerals are being introduced	Improving the company's image, reducing administrative impact from government authorities

potential in scientific institutions and in practice does not meet the requirements.

In order to identify priority problems that require resolution, an expert survey was carried out among 20 specialists related to the problem of waste management (employees of academic institutes of economics and mining of the Russian Academy of Sciences, employees of the State Mining University, departments of mining production and industrial ecology of mining companies, employees of the Ministry of natural resources and ecology of the Sverdlovsk region). The initial data from the expert survey are given in [table 1](#).

As a result of processing the materials of the expert survey, a ranking was made of the identified problems that hinder the process of development of technogenic deposits ([Table 2](#)).

As follows from [table 2](#), the priority problems that require a priority solution are:

- Imperfection of the regulatory framework;
- No benefits or preferences for using TMFs;
- Lack of environmentally friendly, resource-saving technologies for processing TMFs;

The identified priority problems are external to subsoil users, i. e. assume direct participation of the state in their solution. Currently, state participation in the field of waste management has not received proper development; the public-private partnership mechanism practically does not work, although the benefits from its implementation are obvious, [table 3](#) [22].

Despite the obvious benefits from the development of technogenic deposits, examples of the implementation of relevant investment projects are insignificant. We believe that, to some extent, this situation is related to the incomplete assessment of the national economic effect, i. e., the lack of interest of the state in supporting this activity.

REFERENCES

1. Perepelitsyn V. A. [et al.]. 2013, Technogenic mineral raw materials of the Urals. Ekaterinburg, 332 p. (*In Russ.*)
2. Kashintsev D. History of metallurgy of the Urals. Moscow, vol. 1. 240 p. (*In Russ.*)
3. Mormil S. I. [et al.]. 2002, Technogenic deposits of the Middle Urals and assessment of their environmental impacts. Ekaterinburg, 206 p. (*In Russ.*)
4. Arkhipov A. V., Reshetnyak S. P. 2017, Technogenic deposits: development and formation. Apatity, 175 p. (*In Russ.*)
5. Arbatov A. A. [et al.]. 1988, Unconventional mineral resources. Moscow, 253 p. (*In Russ.*)
6. Distanova U. G., Filko S. 1990, Non-traditional types of non-metallic mineral raw materials. Moscow, 261 p. (*In Russ.*)
7. Nadymov D. S. 2015, Development of an organizational and economic mechanism for the development of technogenic deposits with the involvement of the potential of state development institutions, PhD thesis. Saint Petersburg, 150 p. (*In Russ.*)
8. Chernyavsky A. G. 2020, On the problem of developing technogenic resources. *Mineral'nyye resursy Rossii. Economica i upravlenie* [Mineral resources of Russia. Economy and Management], no. 3 (172), pp. 58–64. (*In Russ.*)
9. Panfilov E. I. 2010, On the problems of increasing the efficiency of functioning of the mineral resource complex of Russia. *Gornaya promyshlennost'* [Mining], no. 4 (92), pp. 2–9. (*In Russ.*)
10. Epshtein I. V. 2013, Increasing the efficiency of subsoil use through the convergence of standards for reporting on reserves of the State Reserves Committee and the National Association for Subsoil Examination and reforming the law "On Subsoil". *Gornaya promyshlennost'* [Mining], no. 6 (112), pp. 32–38. (*In Russ.*)
11. Myaskov A. V., Popov S. M. 2016, Methodological basis for the formation of directions for the use of technogenic mineral raw materials. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mining information and analytical bulletin], no. 6, pp. 231–240. (*In Russ.*)
12. Oshchepkova A. Z., Somova T. N., Kletskina O. V. 2015, Problems of creating directories of the best available technologies in the field of waste management. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and industry of Russia], vol. 19, no. 12, pp. 36–39. (*In Russ.*) <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2015-12-36-39>
13. Bakaeva M. D., Loginov O. N., Stolyarova E. A., Chetverikov S. P. 2009, Biological technology for extracting copper from flotation enrichment waste of sulfide ores. *Biotekhnologiya* [Biotechnology], no. 5, pp. 45–53. (*In Russ.*)

14. Kuzyakina T. I., Khainasova T. S., Levenets O. O. 2008, Biotechnology for extracting metals from sulfide ores. *Vestnik Kamchatskoy regional'noy assotsiatsii Uchebno-nauchnyy tsentr. Nauki o Zemle* [Bulletin of the Kamchatka Regional Association Educational and Scientific Center. Geosciences], no. 2, issue 12, pp. 76–86. (In Russ.)
15. Cherkasova D. V., Bakaeva M. D., Silishchev N. N., Chetverikov S. P. 2010, Extraction of non-ferrous metals from waste from processing sulfide ores in the Ural region. *Problemy regional'noy ekologii* [Problems of regional ecology], no. 6, pp. 102–106. (In Russ.)
16. Vereh-Belousova E. I. 2019, On the issue of environmentally friendly methods for processing rock dumps from coal mines in the Lugansk region. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti* [Life safety], no. 4 (220), pp. 42–46. (In Russ.)
17. Shpirt M. Ya., Artemyev V. B., Silyutin S. A. 2013, Use of solid waste from coal mining and processing. Moscow, 432 p. (In Russ.)
18. Naftal M. N., Vydish A. V., Timoshenko E. M., Ryleev E. A., Petrov A. F. 2007, Features and trends in the development of autoclave hydro-metallurgy of heavy non-ferrous and precious metals at the turn of the 21st century. *Tsvetnyye metally* [Non-ferrous metals], no. 7, pp. 53–59. (In Russ.)
19. Mel'nikov N. N., Skorokhodov V. F., Mesyats S. P. Ivanova V. A., Bilin A. L., Beloborodov V. I., Khokhulya M. S., Zakharova I. B., Mitrofanova G. V., Rybin V. V., Ostapenko S. P., Nikitin R. M., Petrov A. A., Opalev A. S., Volkova E. Yu. 2013, Environmental strategy for the development of the mining industry. *Gornyy zhurnal* [Mining Journal], no. 12, pp. 109–116. (In Russ.)
20. Gershenkop A. Sh., Evdokimova G. A., Zalkind O. A. 2012, Assessment of the significance of the microbiological factor during storage and processing of enrichment waste of non-sulfide ores. *Sovremennyye metody tekhnologicheskoy mineralogii v protsessakh kompleksnoy i glubokoy pererabotki mineral'nogo syr'ya* [Modern methods of technological mineralogy in the processes of complex and deep processing of mineral raw materials], pp. 306–308. (In Russ.)
21. Seleznev S. G. 2013, On the problem of using mining waste. *Mineral'nyye resursy Rossii. Economica i upravlenie* [Mineral resources of Russia. Economy and Management], no. 4, pp. 40–44. (In Russ.)
22. Pakhalchak G. Yu. 2014, The role of partnership between the state and business in the economic regulation of priority environmental problems. *Diskussiya* [Discussion], no. 8, pp. 74–79. (In Russ.)

The article was received on October 31, 2023

Проблемы, осложняющие введение в хозяйственный оборот техногенных месторождений

Маргарита Николаевна ИГНАТЬЕВА^{1,2*}

Владимир Евгеньевич СТРОВСКИЙ^{1*}

Оксана Александровна ЛОГВИНЕНКО¹

Оксана Геннадьевна КОМАРОВА¹

¹Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия

²Институт экономики УрО РАН, Екатеринбург, Россия

Аннотация

Актуальность. В современных условиях истощения минерально-сырьевой базы, ухудшения природных условий вновь открываемых месторождений приоритетную значимость приобретает освоение техногенных минеральных ресурсов. Однако, как показывает анализ, уровень использования твердых минеральных образований продолжает оставаться незначительным.

Цель исследования – выявление причин, тормозящих процесс вовлечения техногенных месторождений в хозяйственный оборот, в целях предупреждения их возникновения или смягчения отрицательных воздействий.

Методы исследования. В процессе исследования использовались методы сравнительного анализа, аналогий, экспертного анализа.

Результаты. Анализ и обобщение отечественного и зарубежного опыта обращения с ТМО позволили выявить основные причины, препятствующие расширению практики освоения техногенных месторождений. Было выявлено девять подобных причин: несовершенство нормативно-правового обеспечения обращения с ТМО, низкая степень геологической изученности, высокий геологический риск, недостаток технологий переработки отходов, отсутствие необходимых финансовых средств, несовершенство экономического механизма, используемого государством при регулировании деятельности по обращению с отходами, возможность удлинения срока хранения ТМО, несовершенство наличия информации о ТМО, недостаток квалифицированных кадров. В результате проведения экспертного опроса 20 специалистов было выполнено ранжирование выявленных причин и установлены наиболее приоритетные. В их число вошли: несовершенство нормативно-правовой базы, недостаток требуемых экологически безопасных технологий и отсутствие эффективного экономического механизма государственного регулирования этой деятельности.

Выводы. Выявление первоочередных причин, тормозящих процесс освоения техногенных месторождений, определяет дальнейшую направленность работы по их предотвращению или смягчению отрицательных воздействий.

Ключевые слова: техногенные месторождения, проблемы, освоение, приоритетность, ранжирование проблем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Техногенное минеральное сырье Урала / В. А. Перепелицын [и др.]. Екатеринбург: РИО УрО РАН, 2013. 332 с.
2. Кашинцев Д. История металлургии Урала. М.: ГОНТИ, 1939. Т. 1. 240 с.
3. Техногенные месторождения Среднего Урала и оценка их воздействий на окружающую среду / С. И. Мормилль [и др.]. Екатеринбург, 2002. 206 с.
4. Архипов А. В., Решетняк С. П. Техногенные месторождения: разработка и формирование. Апатиты: КНЦ РАН, 2017. 175 с.
5. Нетрадиционные ресурсы минерального сырья / А. А. Арбатов [и др.]. М.: Недра, 1988. 253 с.
6. Нетрадиционные виды нерудного минерального сырья / под ред. У. Г. Дистанова, С. Филько. М.: Недра, 1990. 261 с.
7. Надымов Д. С. Разработка организационно-экономического механизма освоения техногенных месторождений с привлечением потенциала государственных институтов развития: дис. ... канд. экон. наук. СПб: НМСУ «Горный», 2015. 150 с.
8. Чернявский А. Г. О проблеме освоения техногенных ресурсов // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2020. № 3(172). С. 58–64.
9. Панфилов Е. И. О проблемах повышения эффективности функционирования минерально-сырьевого комплекса России // Горная промышленность. 2010. № 4(92). С. 2–9.
10. Эпштейн И. В. Повышение эффективности использования недр через сближение стандартов отчетности о запасах ГКЗ и НАЭН и реформирование закона «О недрах» // Горная промышленность. 2013. № 6(112). С. 32–38.
11. Мясков А. В., Попов С. М. Методические основы формирования направлений использования техногенного минерального сырья // ГИАБ. 2016. № 6. С. 231–240.

✉ rinis@mail.ru

 <http://orcid.org/0000-0001-9014-905X>

**ief.etp@m.ursmu.ru

 <http://orcid.org/0000-0001-6898-4286>

12. Ощепкова А. З., Сомова Т. Н., Клецкина О. В. Проблемы формирования справочников наилучших доступных технологий в области обращения с отходами // Экология и промышленность России. 2015. Т. 19. № 12. С. 36–39. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2015-12-36-39>
13. Бакаева М. Д., Логинов О. Н., Столярова Е. А., Четвериков С. П. Биологическая технология извлечения меди из отходов флотационного обогащения сульфидных руд // Биотехнология. 2009. № 5. С. 45–53.
14. Кузякина Т. И., Хайнасова Т. С., Левенец О. О. Биотехнология извлечения металлов из сульфидных руд // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2008. № 2. Вып. 12. С. 76–86.
15. Черкасова Д. В., Бакаева М. Д., Силищев Н. Н., Четвериков С. П. Извлечение цветных металлов из отходов переработки сульфидных руд Уральского региона // Проблемы региональной экологии. 2010. № 6. С. 102–106.
16. Верех-Белоусова Е. И. К вопросу экологически безопасных способов переработки породных отвалов угольных шахт Луганщины // Безопасность жизнедеятельности. 2019. № 4(220). С. 42–46.
17. Шпирт М. Я., Артемьев В. Б., Силиutin С. А. Использование твердых отходов добычи и переработки углей. М.: Горное дело, 2013. 432 с.
18. Нафталья М. Н., Выдыш А. В., Тимошенко Э. М., Рылеев Е. А., Петров А. Ф. Особенности и тенденции развития автоклавной гидрометаллургии тяжелых цветных и драгоценных металлов на рубеже XXI столетия // Цветные металлы. 2007. № 7. С. 53–59.
19. Мельников Н. Н., Скороходов В. Ф., Месяц С. П., Иванова В. А., Билин А. Л., Белобородов В. И., Хохуля М. С., Захарова И. Б., Митрофанова Г. В., Рыбин В. В., Остапенко С. П., Никитин Р. М., Петров А. А., Опалев А. С., Волкова Е. Ю. Экологическая стратегия развития горнодобывающей отрасли // Горный журнал. 2013. № 12. С. 109–116.
20. Гершенкоп А. Ш., Евдокимова Г. А., Залкинд О. А. Оценка значимости микробиологического фактора при хранении и переработке обогатительных отходов несulfидных руд // Современные методы технологической минералогии в процессах комплексной и глубокой переработки минерального сырья (Плаксинские чтения-2012): материалы междунар. совещ. Петрозаводск: КНЦ РАН, 2012. С. 306–308.
21. Селезнев С. Г. О проблеме использования горнопромышленных отходов // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2013. № 4. С. 40–44.
22. Пахальчак Г. Ю. Роль партнерства государства и бизнеса в экономическом регулировании приоритетных экологических проблем // Дискуссия. 2014. № 8. С. 74–79.

Статья поступила в редакцию 31 октября 2023 года

Международный опыт институционального обеспечения геологического изучения и использования недр

Сергей Миншакирович САЛЬМАНОВ*

АО «Полиметалл УК», Санкт-Петербург, Россия

Аннотация

Актуальность. Управление минеральными ресурсами является ключом к вкладу горнодобывающей промышленности в устойчивое развитие стран путем обеспечения граждан максимальными благами от разработки и добычи полезных ископаемых. Преобразование ограниченных ресурсов в экономический рост и социальное развитие лучше всего достигается путем их рациональной добычи и переработки в рамках эффективной политики, установленной правительством, и надлежащего институционального обеспечения. С другой стороны, неэффективное управление разработкой полезных ископаемых, негибкие институты и организации, которые не реагируют на потребности общества, могут привести к огромному количеству негативных последствий. Необходимость более глубокой проработки институционального базиса, обеспечивающего эффективное недропользование, обусловило выбор темы данной статьи.

Цель работы заключается в проведении анализа международного опыта институционального обеспечения геологического изучения и использования недр.

Методы. В процессе исследования использовались общенаучные и специальные методы научного познания, а именно: анализ и синтез, сравнение, систематизация, обобщение, группировка, абстракция.

Результаты работы и область применения. В ходе проведенного исследования была рассмотрена теоретическая сущность понятия «институциональное обеспечение недропользования». На основании изучения международного опыта выделено два типа моделей организации институциональной среды в сфере изучения и использования природных недр: активная и пассивная. Детальное внимание в статье уделено активной модели, рассмотрен ее субъектный состав и выделены отличительные черты. На примере Румынии, Швеции и Мексики проанализированы особенности реализации активной модели на практике. Полученные результаты могут использоваться государственными органами страны для усовершенствования институтов управления в сфере недропользования.

Вывод. Разнообразие систем государственного управления недрами, применяемых различными странами мира, позволяет обогатить знания в данной отрасли и выявить лучшие практики применения методов и механизмов управления институциональным обеспечением геологического исследования недр с целью их возможной адаптации к применению в Российской Федерации.

Ключевые слова: минеральная база, институты, регулирование, разрешение, концессия, закон, государство, разработка, плата.

Введение

Полезные ископаемые имеют огромное значение для экономического развития большинства стран мира. В России они играют решающую роль в надлежащем обеспечении потребностей экономики в минерально-сырьевых ресурсах, формируют значительную долю ВВП и валютных поступлений в бюджет [1]. С другой стороны, природные богатства нуждаются в эффективном извлечении, охране и воспроизводстве минерально-сырьевой базы.

Как известно, процессы воспроизводства минерально-сырьевой базы напрямую связаны с организацией и финансированием геологического изучения месторождений полезных ископаемых, что обеспечивает прирост их запасов [2]. В то же время необходимо отметить, что минерально-сырьевая политика и планирование разведки недр в большинстве своем до сих пор рассматриваются исключительно в геологической плоскости практически

без учета экономико-правового аспекта и необходимости децентрализации институционального, регионального и финансового обеспечения недропользования.

Институты, обычно определяемые как «правила игры в обществе», представляют собой одну из фундаментальных основ экономического роста. Такие аспекты, как ограничения для исполнительной власти или верховенство закона, формируют стимулы для инвестиций и, следовательно, траектории роста. Кроме того, эффективность функционирования любой отрасли и сегмента экономики зависит от организационно-правовой формы образующих их институций, распределения функций и задач в пределах полномочий каждого из них и позиционирования как неотъемлемых составляющих системы [3]. Однако выявление причинно-следственного влияния институтов на экономическую деятельность представля-

*Salmanov@polymetal.ru

ет собой сложную задачу из-за наличия коррелирующих факторов, а также потому, что институциональные характеристики сами по себе являются эндогенными равновесными результатами.

Рассматривая данную проблематику в контексте геологоразведки, необходимо отметить, что, формируя «спрос» на поиск месторождений, инвесторы учитывают вероятность обнаружения и чистую приведенную стоимость обнаруженных минеральных ресурсов. Первая зависит от геологии. Вторая – эксплуатационные затраты и риски в большей мере определяются институтами [4]. Разработка потенциальных месторождений осуществляется посредством лицензирования, налоговых, социальных и инвестиционных условий и также, по всей видимости, зависит от качества институтов. По этим причинам считается, что разведка полезных ископаемых будет варьироваться в зависимости от институционального качества для данного набора геологических условий [5].

С учетом изложенного очевидно, что для поиска оптимальной модели институционального обеспечения геологического изучения и использования недр целесообразно провести анализ международного опыта, выявить передовые практики и наработки, что и обусловило выбор темы данной статьи.

Исследованию теоретических и практических основ формирования и реализации минерально-сырьевой политики посвятили свои труды З. М. Назарова, О. Е. Рощина, М. Ф. Харламов, Ю. В. Забайкин, О. В. Попов, Brian Edward, Boyd Dirk.

Основные функции институционального механизма проведения геолого-разведывательных работ, полномочия и ответственность соответствующих организаций нашли свое отражение в трудах Б. К. Михайлова, А. В. Крюкова, С. Л. Макаревича, С. А. Кимельмана, Deborah Akua Asamoah; Mtegha Hudson; Cawood Frederick.

Система государственного управления недропользованием, которая широко используется в разных странах СНГ, в том числе и в России, детально анализируется А. В. Душиным, Л. В. Оганесяном, Р. В. Поленовым, Д. В. Лютягиным, Л. П. Лейдерманом, Ю. А. Агабалином

В научных работах указанных авторов понятие геологической отрасли рассматривается главным образом с точки зрения государственного регулирования недропользованием. В то же время роль прочих субъектов, входящих в институциональный контур разработки и использования минерально-сырьевой базы, изучается крайне фрагментарно. Также в отдельной проработке нуждаются вопросы, связанные с усовершенствованием процедур предоставления прав на пользование недрами, диверсификацией источников финансирования в пределах отдельных стадий геологоразведочных и добывающих работ.

Таким образом, с учетом изложенного **цель статьи** заключается в проведении анализа международного опыта институционального обеспечения геологического изучения и использования недр.

Результаты

Прежде всего, отметим, что институциональное обеспечение сферы недропользования – это система, включающая в себя правовые и организационные методы,

специальные институты и другие заинтересованные стороны, которая в целом направлена на формирование и регулирование комплекса отношений в сфере недропользования, а также осуществление контроля за соблюдением требований к хозяйствующим субъектам, осуществляющим геологоразведочные работы и непосредственную разработку месторождений с целью обеспечения рационального использования недр для нужд экономики государства в минеральном сырье при соблюдении требований охраны окружающей среды [6, 7]. Таким образом, институциональное обеспечение сферы недропользования заключается в упорядочении взаимоотношений горнодобывающих компаний, государства и потребителей путем установления определенных норм, правил и критериев.

Как свидетельствует приведенное определение, система институционального обеспечения является очень широкой и многогранной, а также опосредует разнообразный комплекс отношений. Предметом этих отношений выступают недра, предоставляемые в использование для геологического исследования; добычи полезных ископаемых; строительства и эксплуатации сооружений, не связанных с недропользованием; создания геологической территории научного и культурного значения; для выполнения работ, предусмотренных соглашением о разделе продукции и удовлетворения других потребностей [8, 9].

В научной литературе достаточно детально описан опыт институционального обеспечения недропользования стран-лидеров в горнодобывающем секторе, таких как Канада, США, Австралия, ЮАР, Чили. В то же время разнообразие систем государственного управления недрами, применяемых различными странами мира, позволяет обогатить знания в данной отрасли и оценить эффективность применяемых методов управления.

Анализ зарубежного опыта и практики позволил выделить две модели институционального обеспечения сферы недропользования.

1. *Активная модель.* Согласно этой модели, государственные органы управления стран или уполномоченные структуры воздействуют на бизнес с целью активизации действий по наращиванию объемов поисковых и геологоразведочных работ, что, как правило, приводит к приросту запасов полезных ископаемых. Зачастую государственные органы самостоятельно участвуют в изучении недр и выступают организаторами различных концессионных сделок и соглашений на поиск перспективных месторождений. Такая модель используется в Швеции, Норвегии, Финляндии, Сербии, Чехии, Болгарии, Словакии, Венгрии, Румынии, Мексике.

2. *Пассивная модель.* Особенностью данной модели является то, что действие государственных институтов направлено преимущественно на косвенное влияние на недропользователей. Геологические службы стран, использующих данную модель (Великобритания, Франция, Германия, Италия, Австрия), призваны решать, прежде всего, правовые, социально-экономические и экологические проблемы.

Автор считает, что государственная политика в области недропользования должна сочетать в разумных пропорциях как методы прямого участия государства в изучении недр, так и эффективно применять методы

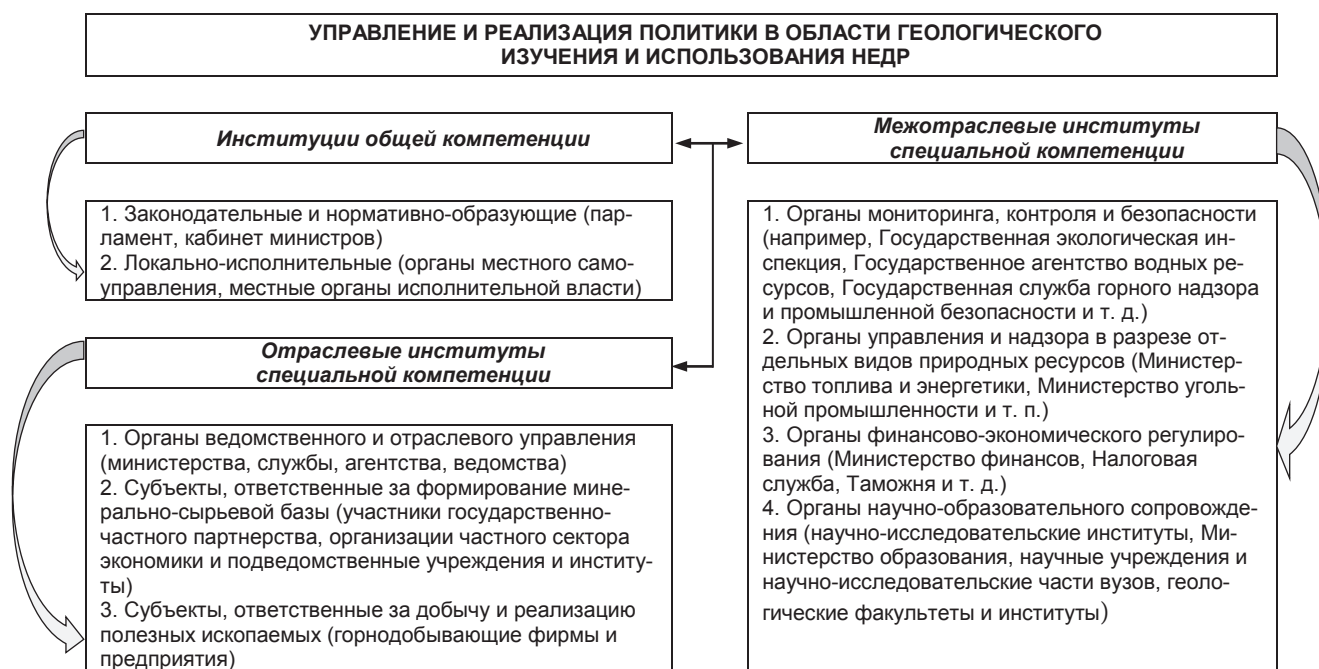


Рисунок 1. Институциональное обеспечение геологического изучения и использования недр в соответствии с активной моделью
Figure 1. Institutional support for geological study and use of subsoil in accordance with the active model

косвенного воздействия на недропользователей с целью повышения инвестиционной привлекательности геологической отрасли.

Активная позиция государства в области изучения недр играет огромную роль в воспроизводстве минерально-сырьевой базы любого государства. Прямое воздействие власти на процессы может нести в себе положительные и отрицательные результаты. По мнению известных ученых-экономистов В. А. Крюкова, Г. О. Грефа, А. В. Душина, [10–12], институциональное обеспечение оказывает ключевое значение на эффективность экономических процессов, в том числе в области недропользования. В связи со сказанным наибольший интерес для изучения представляет активная модель институционального обеспечения. Согласно данной модели, процесс взаимодействия «недропользователь–государство» в рамках геологического изучения и использования недр обеспечивается комплексом государственных и негосударственных институтов.

Исходя из анализа действующей нормативно-правовой базы и функционального назначения, институциональное обеспечение изучения и использования недр в государствах, которые реализуют активную модель, можно разделить на три блока влияния: институты общей компетенции, межотраслевые институты специальной компетенции; отраслевые институты специальной компетенции (рис. 1).

Проведенные исследования институционального обеспечения геологического изучения и использования недр на примере конкретных стран показали следующее.

Румыния. Румыния обладает широким спектром природных ресурсов, которые включают нефть, природный газ, золото, серебро, уран. В стране производится

значительное количество глинозема, цемента, угля, свинца, медной и железной руды. Румыния не входит в число стран-лидеров горнодобывающей промышленности, но обладает значительным потенциалом ее развития. Добыча полезных ископаемых в Румынии регулируется двумя законами: Горным законом и Законом об углеводородах. Первый распространяется преимущественно на горнодобывающую промышленность и касается добычи металлических руд, бурых и каменных углей, соли, минеральных вод и других неметаллических ископаемых. Второй закон регулирует добычу углеводородов, а именно нефти, конденсата и природного газа. Оба акта определяют, что все ресурсы, которые сосредоточены на территории Румынии и в экономической зоне страны на шельфе Черного моря, находятся в государственной собственности, а право на их добычу в обмен на выплату ренты может получить любое юридическое лицо [13].

Румынским законодательством определено, что регулятором в сфере всей добычи является Национальное агентство по природным ресурсам (NAMR). На этот орган возложены следующие функции: определение условий соглашений на добычу углеводородов и их подписание от имени государства; регулирование всех операций, связанных с разведкой и добычей углеводородов; осуществление контроля соответствующей деятельности; ведение базы данных геологической информации; регулирование деятельности подземных хранилищ углеводородов и трубопроводов в нефтегазовых промыслах.

Для осуществления нефтегазовых операций, а именно разведки, разработки месторождений, добычи, компании заключают сделку и получают участок в концессию на срок до 30 лет, при этом соответствующее соглашение может быть продлено по соглашению компании оператора и NAMR еще на 15 лет. Все детали сделки компания согласо-

паемых. Ключевой функцией геологической службы Швеции является удовлетворение потребностей общества в качественной геологической информации относительно уровня запасов полезных ископаемых, пространственного планирования, охраны окружающей среды, промышленной уязвимости и национальной безопасности.

Основные функции службы заключаются в следующем: 1) поддержка развития горнорудной промышленности; 2) содействие использованию геологической информации в процессе планирования геологического изучения и использования недр (картирование почв, картирование ресурсов подземных вод, геохимическое и геофизическое картирование); 3) экологизация недропользования; 4) вывод геологии и геологических знаний на первый план в социальных дискуссиях в рамках научных школ (ежегодно SGU финансирует университеты Швеции на 5,8 млн шведских крон в рамках выполнения исследовательских проектов); 4) горный контроль [17].

Держатель разрешения на разведку и на следующем этапе держатель концессии на эксплуатацию также должен подать заявку на получение разрешений в соответствии с другими законодательными актами до начала работ, например, разрешения в соответствии с Законом о планировании и строительстве, Экологическим кодексом и Законом о древних памятниках и находках

Методы и инструменты обработки геологической информации в Швеции являются одними из лучших в мире. Система предоставления этой информации конечным пользователям является лучшей практикой в мировой горнопромышленной индустрии. Применение подобного опыта в нашей стране могло бы существенно повысить инвестиционную привлекательность геологоразведочной отрасли и вовлечь новых игроков в данный сектор рынка.

Мексика. Минерально-сырьевая база Мексики весьма разнообразна. Страна занимает первое место в мире по запасам графита и флюорита, третье – сурьмы и серебра, четвертое – серы и ртути. Достаточно велики запасы нефти, газа, свинцово-цинковых, медных, марганцевых, железных руд, урана, золота.

Особенностью институционального обеспечения геологического изучения и использования недр в Мексике является тот факт, что до недавнего времени права на разработку минерально-сырьевой базы предоставлялись исключительно государственной компании PEMEX. Энергетическая реформа 2013/2014 гг. устранила эту монополию: несмотря на то, что недра продолжают быть собственностью государства, их разработку и добычу ресурсов могут проводить и частные компании, в том числе зарубежные инвесторы [18].

Министерство энергетики Мексики является органом, лицензирующим недропользование твердых полезных ископаемых на основании Горного закона Мексики.

В контур институтов государственного управления страны также входят:

1. Подразделение министерства энергетики – Генеральный координатор ресурсов, которое занимается ре-

гулированием, контролем и оценкой всей деятельности по разведке и добыче углеводородов;

2. Мексиканский геологический центр, который консолидирует геологическую информацию о недрах;

3. Агентство по вопросам промышленной безопасности и защиты окружающей среды; выдает экологические разрешения перед началом разведки, бурения и добычи;

4. Национальный институт статистики, географии и информации; получает, обрабатывает, систематизирует, учитывает и хранит информацию о недропользовании в Мексиканских Соединенных Штатах.

Финансирование геологоразведочных работ и добычи полезных ископаемых осуществляется через доверительный фонд по добыче полезных ископаемых. Между тем любое финансирование, включая финансирование государственных организаций-недропользователей, осуществляется с согласия министерства финансов, а лимиты финансирования устанавливаются Конгрессом Мексики.

Закон об углеводородах регулирует основные вопросы деятельности по разведке и добыче этих энергоресурсов, Закон о доходах от углеводородов регулирует все компенсации, налоги и роялти, применяемые к каждому из видов сделок, а также правовые аспекты по управлению и надзору за их выполнением.

Опыт развития горнодобывающей промышленности Мексики интересен с точки зрения развития институционального обеспечения. Мексика занимает шестое место в мире по площади, ее минерально-сырьевая база достаточно насыщена и представлена большинством известных минеральных ресурсов. Экономическая модель Мексики и происходящие в ней политические и экономические процессы во многом напоминают российскую историю. Российская Федерация может опереться на мексиканский опыт и не допустить ошибок, совершенных мексиканским руководством, а также перенять успешные латиноамериканские практики и применить их с пользой для развития собственной минерально-сырьевой базы.

Заключение

В вопросах геологоразведки и контроля за добычей полезных ископаемых у каждой страны наработаны собственные системы институционального обеспечения, которые включают различные государственные органы, а также представителей других заинтересованных сфер.

Анализ зарубежного опыта позволил выделить две модели институционального обеспечения геологического изучения и использования недр: активную и пассивную. В процессе исследования детальное внимание уделено активной модели, рассмотрен ее субъектный состав и выделены отличительные черты. На примере Румынии, Швеции и Мексики проанализированы особенности реализации активной модели на практике.

Полученные результаты могут найти свое применение в национальных органах, регулирующих недропользование в разных странах мира, с целью имплементации лучших практик и передового опыта, а также стимулирования прогресса в институциональных преобразованиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Глушкова Т. А., Талалай А. Г., Перельгин В. Т., Чечулин В. И., Баль В. И. Результаты и перспективы применения сертификационных работ в области геологического изучения недр // Рациональное освоение недр. 2020. № 4. С. 50–56.

2. Левченко Е. Н. Научно-методическое обеспечение в системе геологического изучения недр, добычи и переработки минерального сырья // Разведка и охрана недр. 2021. № 6. С. 61–67.
3. Castillo E., Roa C. Defining geological maturity: The effect of discoveries on early-stage mineral exploration // Resources policy. 2021. Vol. 74. P. 117–121. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102378>
4. Ламбева Л. Е. Экспертиза проектов геологического изучения недр: регулирование и практика // Нефть, газ и право. 2021. № 2-4. С. 40–45.
5. Li M., Liu J., Chn Ya., Yang Zh. Can sustainable development strategy reduce income inequality in resource-based regions? A natural resource dependence perspective // Resources policy. 2023. Vol. 81. P. 67–72. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.103330>
6. Gustafsson M.-T., Scurrah M. Subnational governance strategies at the extractive frontier: collaboration and conflict in Peru // Territory, politics, governance. 2023. Vol. 11. Issue 1. P. 1–18. <https://doi.org/10.1080/21622671.2020.1840425>
7. Попов А. А., Салиева Р. Н. Регулирующая роль государства в сфере геологического изучения недр // Нефтяная провинция. 2021. № 3(27). С. 170–188. <https://doi.org/10.25689/NP.2021.3.170-188>
8. Назарова З. М., Рощина О. Е., Забайкин Ю. В., Новикова С. А., Леонидова Ю. А. Актуализация предложений по развитию заявительного принципа недропользования // Булатовские чтения: материалы IV Междунар. науч.-практ. конф. 2020. Т. 7. С. 258–264.
9. Tibebe B., Fitsum A. Identifying Ethiopian National Mining Cadastre System post implementation success factors: the case of Ministry of Mines of Ethiopia // International Journal of Business Information Systems. 2023. Vol. 42. No. 3/4. P. 383–404. <https://doi.org/10.1504/ijbis.2023.129717>
10. Крюков В. А. Особенности формирования системы недропользования в России – взгляд на проблему с позиции институциональной теории // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2005. № 5. С. 29–36.
11. Греф Г. О. Необходимость технологизации и проведения реформ в жизнь – одна из ключевых проблем модернизации // Модернизация экономики и выращивание институтов: в 2 кн. / отв. ред. Е. Г. Ясин. М.: Изд. дом ГУ ВШЭ, 2005. Кн. 1. С. 71–74.
12. Душин А. В. Институциональные изменения: частные стимулы американского и российского законодательства в минерально-сырьевом комплексе // Труды II Всерос. зимней школы по институциональной экономике. Екатеринбург: Ин-т экономики УрО РАН, 2009. С. 58–61.
13. Liu D., Wang D., Mao J. Study on policy synergy strategy of the central government and local governments in the process of coal de-capacity: Based on a two-stage evolutionary game method // Resources policy. 2023. Vol. 80. P. 23–29. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.103132>
14. The regulation of decommissioning, abandonment and reuse initiatives in the oil and gas industry: from obligation to opportunities / ed. by E. G. Pereira, A. Wawryk, H. Trischmann, C. Banet, K. B. Hall. Alphen aan den Rijn, Netherlands: Wolters Kluwer, 2020. 696 p.
15. Yıldırım S., Gedikli A., Erdoğan S., Vildirim D. Ç. Natural resources rents-financial development nexus: Evidence from sixteen developing countries // Resources policy. 2020. Vol. 68. P. 100–107. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2020.101705>
16. Poelzer G., Yu S. All trust is local: Sustainable development, trust in government and legitimacy in northern mining projects // Resources policy. 2021. Vol. 70. P. 67–70. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2020.101888>
17. Walsh S. D. C., Northey S. A., Huston D., Yellishetty M., Czarnota K. Bluecap: A geospatial model to assess regional economic-viability for mineral resource development // Resources policy. 2020. Vol. 66. P. 45–52. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2020.101598>
18. Cervantes M. Á. M., Garduño-Rivera R. Mining-energy public policy of lithium in Mexico: Tension between nationalism and globalism // Resources policy. 2022. Vol. 77. P. 12–19. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.102686>

Статья поступила в редакцию 04 августа 2023 года

International experience in institutional support for geological study and use of subsoil

Sergey Minshakirovich SAL'MANOV*

JSC "Polymetal Management", Saint Petersburg, Russia

Abstract

Relevance. Mineral resource management is key to the mining industry's contribution to the sustainable development of countries by ensuring that citizens receive maximum benefits from mineral development and extraction. The transformation of scarce resources into economic growth and social development is best achieved through their sustainable extraction and processing within the framework of effective policies set by the government and proper institutional support. On the other hand, ineffective management of mineral development, inflexible institutions and organizations that are not responsive to the needs of society can lead to a huge number of negative consequences. The need for a more in-depth study of the institutional basis that ensures efficient subsoil use determined the choice of the topic of this article.

The purpose of the work is to analyze international experience in institutional support for geological study and use of subsoil.

Methods. In the process of research, general scientific and special methods of scientific knowledge were used, namely: analysis and synthesis, comparison, systematization, generalization, grouping, abstraction.

Results of work and its scope. In the course of the study, the theoretical essence of the concept of "institutional support for subsoil use" was considered. Based on the study of international experience, two types of models for organizing the institutional environment in the field of study and use of natural resources have been identified: active and passive. The article pays detailed attention to the active model, considers its subject composition and highlights its distinctive features. Using the examples of Romania, Sweden and Mexico, the features of the implementation of the active model in practice are analyzed. The results obtained can be used by the country's government agencies to improve management institutions in the field of subsoil use.

Conclusion. The variety of public subsoil management systems used by different countries of the world makes it possible to enrich knowledge in this industry and identify the best practices in the application of methods and mechanisms for managing the institutional support of geological subsoil research with a view to their possible adaptation to use in the Russian Federation.

Keywords: mineral base, institutions, regulation, permit, concession, law, state, development, payment.

REFERENCES

1. Glushkova T. A., Talalay A. G., Perelygin V. T., Chechulin V. I., Bal V. I. 2020, Results and prospects for the application of certification work in the field of geological study of subsoil. *Ratsional'noye osvvoeniye nedr* [Rational development of subsoil], no. 4, pp. 50–56. (In Russ.)
2. Levchenko E. N. 2021, Scientific and methodological support in the system of geological study of subsoil, mining and processing of mineral raw materials. *Razvedka i okhrana nedr* [Exploration and protection of subsoil], no. 6, pp. 61–67. (In Russ.)
3. Castillo E., Roa C. 2021, Defining geological maturity: The effect of discoveries on early-stage mineral exploration. *Resources policy*, vol. 74, pp. 117–121. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102378>
4. Lambeva L. E. 2021, Expertise of geological exploration projects: regulation and practice. *Neft', gaz i parvo* [Oil, gas and law], no. 2-4, pp. 40–45. (In Russ.)
5. Li M., Liu J., Chtn Ya., Yang Zh. 2023, Can sustainable development strategy reduce income inequality in resource-based regions? A natural resource dependence perspective. *Resources policy*, vol. 81, pp. 67–72. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.103330>
6. Gustafsson M. T., Scurrah M. 2023, Subnational governance strategies at the extractive frontier: collaboration and conflict in Peru. *Territory, politics, governance*, vol. 11, issue 1, pp. 1–18. <https://doi.org/10.1080/21622671.2020.1840425>
7. Popov A. A., Salieva R. N. 2021, The regulatory role of the state in the field of geological study of subsoil. *Neftyanaya provintsia* [Oil province], no. 3 (27), pp. 170–188. <https://doi.org/10.25689/NP.2021.3.170-188> (In Russ.)
8. Nazarova Z. M., Roshchina O. E., Zabaikin Yu. V., Novikova S. A., Leonidova Yu. A. 2020, Updating proposals for the development of the declarative principle of subsoil use. *Bulatov readings: materials of the IV International scientific-practical conference*, vol. 7, pp. 258–264. (In Russ.)
9. Tibebe B., Fitsum A. 2023, Identifying Ethiopian National Mining Cadastre System post implementation success factors: the case of Ministry of Mines of Ethiopia. *International Journal of Business Information Systems*, vol. 42, no. 4, pp. 383–404. <https://doi.org/10.1504/ijbis.2023.129717>
10. Kryukov V. A. 2005, Features of the formation of the subsoil use system in Russia - a look at the problem from the position of institutional theory. *Mineral'nyye resursy Rossii. Ekonomika i upravleniye* [Mineral resources of Russia. Economics and Management], no. 5, pp. 29–36. (In Russ.)
11. Gref G. O. 2005, The need for technologization and implementation of reforms is one of the key problems of modernization. *Modernizatsiya ekonomiki i vyrashchivaniye institutov* [Modernizing the economy and growing institutions], no. 1, pp. 71–74. (In Russ.)
12. Dushin A. V. 2009, Institutional changes: private incentives of American and Russian legislation in the mineral resources complex. *Proceedings of II All-Russian winter school on institutional economics*. Yekaterinburg, pp. 58–61. (In Russ.)

*Salmanov@polymetal.ru

13. Liu D., Wang D., Mao J. 2023, Study on policy synergy strategy of the central government and local governments in the process of coal de-capacity: Based on a two-stage evolutionary game method. *Resources policy*, vol. 80, pp. 23–29. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.103132>
14. Pereira E. G., Wawryk A., Trischmann H., Banet C., Hall K. B. 2020, The regulation of decommissioning, abandonment and reuse initiatives in the oil and gas industry: from obligation to opportunities. Netherlands, 696 p.
15. Yıldırım S., Gedikli A., Erdoğan S., Vildirim D. Ç. 2020, Natural resources rents-financial development nexus: Evidence from sixteen developing countries. *Resources policy*, vol. 68, pp. 100–107. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2020.101705>
16. Poelzer G., Yu S. 2021, All trust is local: Sustainable development, trust in government and legitimacy in northern mining projects. *Resources policy*, vol. 70, pp. 67–70. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2020.101888>
17. Walsh S. D. C., Northey S. A., Huston D., Yellishetty M., Czarnota K. 2020, Bluecap: A geospatial model to assess regional economic-viability for mineral resource development. *Resources policy*, vol. 66, pp. 45–52. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2020.101598>
18. Cervantes M. Á. M., Garduño-Rivera R. 2022, Mining-energy public policy of lithium in Mexico: Tension between nationalism and globalism. *Resources policy*, vol. 77, pp. 12–19. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.102686>

The article was received on August 04, 2023

Текущие изменения и стратегические направления модернизации нефтесервисного рынка

Тимофей Алексеевич БЕЛОШИЦКИЙ^{1*}
Вера Витальевна БИРЮКОВА^{1,2**}

¹Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

²Уфимская высшая школа экономики и управления, Уфа, Россия

Аннотация

Актуальность. Инновационно-технологическое развитие нефтесервисного бизнеса сопряжено с потребностью вертикально интегрированных компаний (ВИНК) в услугах, которые в значительной степени зависят от колебаний спроса на углеводородное сырье, поэтому модель стратегического планирования инновационно-технологического развития нефтесервиса, учитывающая современные реалии, будет широко востребована.

Цель исследования – обоснование необходимости реализации модели стратегического планирования при инновационно-технологическом развитии в нефтесервисных компаниях на основе анализа текущих проблем и тенденций нефтесервисного рынка.

Основные результаты. Проведенный в статье анализ проблем и тенденций развития нефтесервисного рынка доказывает, что растущий спрос на углеводороды является ключевым фактором, определяющим рост рынка и формирующим опережающий спрос на геологоразведку, бурение и геофизическое сопровождение. Нарастание санкционного давления может сократить объемы высокотехнологичных сервисных операций вследствие ухода с российского рынка транснациональных корпораций, что может привести к стагнации нефтесервисного рынка и вызвать риски снижения уровней добычи нефти и газа. Связанное с пандемией падение нефтяных котировок на мировых биржах вызвало рост конкуренции как на российском, так и на глобальном нефтесервисных рынках, где проявились две противоположные тенденции: с одной стороны, отмечается снижение спроса на эти услуги, с другой – данные о росте объемов бурения свидетельствуют о перспективах развития отрасли. Новые технологические решения повышают производственную эффективность нефтесервисной отрасли, что требует от компаний концентрации на инновационном развитии и использования модели стратегического планирования внедрения современных технологий совместно с классическими рыночными инструментами. Это определяет практическую значимость результатов настоящего исследования.

Заключение. Анализ возможностей, тенденций и проблем развития рынка нефтесервисных услуг, а также стратегических приоритетов нефтесервисных компаний на современном этапе подтверждает значимость и необходимость внедрения инновационных технологий для формирования и сохранения конкурентных преимуществ на существующем глобальном рынке. Стратегический подход к моделированию развития нефтесервисных компаний позволяет повысить устойчивость и стабильность их развития, а также обеспечивает снижение негативного влияния на окружающую среду в условиях меняющегося энергетического ландшафта.

Ключевые слова: рынок нефтесервисных услуг, стратегическое планирование, модернизация рынка, анализ.

Введение

Актуальность исследования

Рынок нефтесервисных услуг демонстрирует тенденции роста и, по данным The Brainly Insights, к 2030 г. достигнет 312,50 млрд долларов США при среднегодовом темпе роста 5,83 % в период с 2022 по 2030 г. Рост рынка связан с увеличением объемов геологоразведочных работ и добычи нефти и газа, в то же время происходит консолидация рынка, обусловленная необходимостью масштабирования для поддержания конкуренции на все

более сложном и глобальном рынке, а также проблемами, связанными с осуществлением реструктуризации рынка. Наряду с консолидацией рынка существует риск появления новых участников, привлекаемых потенциалом высокой доходности. Такие компании будут сосредоточены на предоставлении инновационных услуг и технологий, которые могут повысить эффективность и снизить затраты [1].

✉ Mohax45@gmail.com

 <https://orcid.org/0009-0008-6590-8892>

**v.birukova@yandex.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-0986-7087>

Нефтесервисная отрасль всегда была и остается основой развития национальной экономики Российской Федерации в современных условиях, поскольку она в значительной степени определяет возможности и условия для решения широкого круга проблем в области высокотехнологических отраслей, цифровизации экономики, социальной сферы и т. д.

Процесс стратегического планирования в отношении нефтесервисных компаний является многомерным, в то время как диапазон используемых подходов достаточно широк, что исключает необходимость изучения особенностей стратегического развития нефтесервисных компаний. Для достижения запланированных ключевых показателей роста нефтесервисной отрасли необходимо стимулировать рост рынка, внедрять в практику деятельности компании технологические инновации и современные инновационные продукты организации сервиса. Таким образом, стратегическое планирование организационного и технологического развития нефтесервисных компаний становится острой актуальной проблемой на современном этапе развития экономики России.

Отсюда целью настоящего исследования будет обоснование необходимости применения и предложение модели стратегического планирования для инновационно-технологического развития нефтесервисных компаний на основе анализа текущих проблем и тенденций нефтесервисного рынка.

Для достижения поставленной цели необходимо последовательное решение следующих задач:

- проанализировать тенденции развития российской и мирового нефтесервисных рынков и определить проблемы и факторы, препятствующие или стимулирующие их развитие;

- определить место и значение инновационных технологических решений в повышении производственной эффективности отрасли, прежде всего – в освоении новых месторождений с трудноизвлекаемыми залежами (ТРИЗ) и нетрадиционными ловушками углеводородов, а также морских и шельфовых месторождений.

Теоретические подходы и методы исследования

В качестве теоретической базы исследования использовались различные подходы к основам стратегического управления компаниями как объектами аналитического планирования и прогнозирования. Для анализа был применен системный подход, контент-анализ профильных научных трудов в литературе и интернет-источниках, обзор современных тенденций в инновационно-технологическом секторе нефтесервиса, наблюдение, а также общенаучные методы анализа и декомпозиции факторов, синтеза и обобщения, мониторинга и контроля.

Работа опирается на методические основы нормативно-правовых и законодательных актов, регулирующих стратегическое планирование развития производственного сектора, включая нефтесервисный бизнес. Из основных принятых в научном сообществе типов стратегических альтернатив особое внимание уделено выбору инновационных альтернатив применительно к нефтесервису с учетом условий внешнего окружения [2].

Методологической основой при этом главным образом служит маркетинговый подход, основанный на про-

движении товаров и услуг, в отличие от управленческого, который предусматривает совершенствование методов управления и повышение эффективности процесса принятия решений [3].

Дополнительные источники данных включали статистическую информацию от научно-исследовательских институтов, а также учебную и специальную литературу, в том числе периодические издания.

Результаты и дискуссия

На мировом нефтесервисном рынке исторически доминируют транснациональные нефтесервисные корпорации – резиденты США, так называемая «Большая четверка»: Halliburton, SLB (ранее Schlumberger), Baker Hughes и Weatherford, которым традиционно свойственны высокие интеграционные возможности в профильном бизнесе. В свою очередь, это с одинаковым успехом позволяет обслуживать как частные, так и государственные нефтегазовые компании, совмещая роли и подрядчиков, и субподрядчиков. Кроме названных участников, изначально высоким уровнем компетенций в глобальном нефтесервисе обладали Россия, Великобритания, Канада и Франция, сохраняющие свои позиции и в настоящее время. С открытием запасов углеводородов в Северном море к данным странам присоединилась Норвегия, а впоследствии – Китайская Народная Республика, демонстрирующая впечатляющие темпы роста высокотехнологических отраслей промышленности в последние десятилетия. Нефтесервисные компании перечисленных государств формируют пул ведущих игроков мирового рынка нефтесервисных услуг, чей значительный научный и производственный потенциал позволяет предоставлять самый широкий набор услуг, включая Hi-Tech технологии, при нефтегазодобыче.

Ко «второму эшелону» нефтесервисного бизнеса можно отнести Италию, Саудовскую Аравию, Мексику, Бразилию и Японию, где нефтесервисный рынок отличается высоким уровнем конкуренции [4].

Современный нефтесервисный бизнес характеризуется широким спектром различных по масштабам и формам собственности предприятий, обладающих уникальными спецификами и производственными характеристиками, а также направлением деятельности и способами управления, позволяющими обеспечивать конкурентные преимущества и сохранять необходимый для развития и соблюдения интересов владельцев уровень прибыли. Тем не менее преобладающую и доминирующую долю рынка, определяющую правила игры в нефтесервисном бизнесе, занимают крупные компании. С одной стороны, это объясняется характерным для нефтесервиса высоким ценовым уровнем входа в бизнес, дополнительно осложненным наличием разного рода препятствий со стороны государственных регулирующих органов (различных для национальных рынков), с другой, – пристальным вниманием транснациональных гигантов к «новичкам», зачастую являющимся носителями нетрадиционных инновационных решений и представляющих перспективные объекты для сделок слияний и поглощений, оживляющих и поддерживающих рынок.

Как было отмечено, крупнейшие компании, такие как Halliburton, SLB, Baker Hughes, Weatherford и другие, контролируют мировой рынок нефтесервисных услуг.

Каждая из таких компаний способна выполнять значительный набор сервисных операций на различных этапах разведки и эксплуатации полезных ископаемых, при этом обладая определенными специализациями в отдельных областях нефтесервисного бизнеса. Например, геофизические исследования и работы в скважинах составляют 90 % нефтесервисного рынка (без учета бурения и строительства скважин), и лидером здесь является SLB, занимающая 57 % объема в данном секторе. Оставшиеся три компании «Большой четверки» контролируют около 80 % бурового рынка, включая горизонтальное и наклонно-направленное бурение, сопровождение в процессе бурения, подготовку долот и буровых растворов, повышение нефтеотдачи пластов. В свою очередь, компания Weatherford – признанный мировой лидер в ловильных работах.

Российская Федерация обладает одними из крупнейших ресурсов углеводородов в мире, занимая соответственно 1-е место по запасам газа и 8-е место по запасам нефти. В процентном отношении это составляет более 40 % мировых запасов газа и около 13 % запасов нефти. В последние годы добыча нефти и газового конденсата продолжает стабильный рост, чему способствуют открытие новых месторождений, разработка нетрадиционных и труднодоступных залежей углеводородов, а также бурение на Арктическом шельфе. Получив новый импульс, активно развивается морское бурение, прежде всего, проекты на дальневосточном шельфе, на Сахалине и на Прикаспийской низменности, а также потенциальные объекты разработки Черного моря. Средние глубины скважин в России постепенно увеличиваются, а проекты становятся более сложными [5].

Российский нефтесервисный рынок демонстрировал устойчивый рост до 2019 г., несмотря на колебания цен на

нефть, связанные главным образом с изменениями уровня спроса на энергоносители в мире. В 2020 г., в условиях пандемии коронавируса и катастрофического падения цен на углеводороды, рынок сохранил незначительный рост, что объясняется временным лагом («запаздыванием») из-за сохранения действия ранее заключенных контрактов на нефтесервисные услуги. Негативные явления, связанные с «коронакризисом», нашли отражение в итогах деятельности за 2021 г., когда падение относительно объемов услуг предыдущего года составило 11,2 %. Здесь необходимо отметить, что максимальное падение в первом полугодии 2021 г. доходило до 25 %, но расширенный спрос на нефтесервисные операции, связанный с восстановлением объемов добычи нефти к концу года, частично компенсировал среднегодовые значения, а продолжение такого спроса в следующем году привело к заметному росту российского нефтесервисного рынка. В результате постпандемийных процессов восстановления экономики нефтесервисный рынок в 2022 г. вырос на 28,3 %, а объем услуг в денежном выражении достиг 26 млрд долл., что в определенной степени связано также с укреплением российского рубля – среднегодовой курс к доллару США, согласно данным ЦБ РФ, составил 68,35 руб./долл. против 73,67 годом ранее – разница почти 8 %.

Динамику изменений объема рынка нефтесервиса в Российской Федерации за период с 2019 по 2022 г. и прогноз на 2023 г. отображает [рис. 1](#).

В случае усиления санкционного давления оставшиеся на российском рынке западные компании могут прекратить свою деятельность, что создаст риск сокращения операций на скважинах. Это может привести к снижению добычи нефти и газа в России, а также к росту цен на эти энергоносители на мировом рынке.

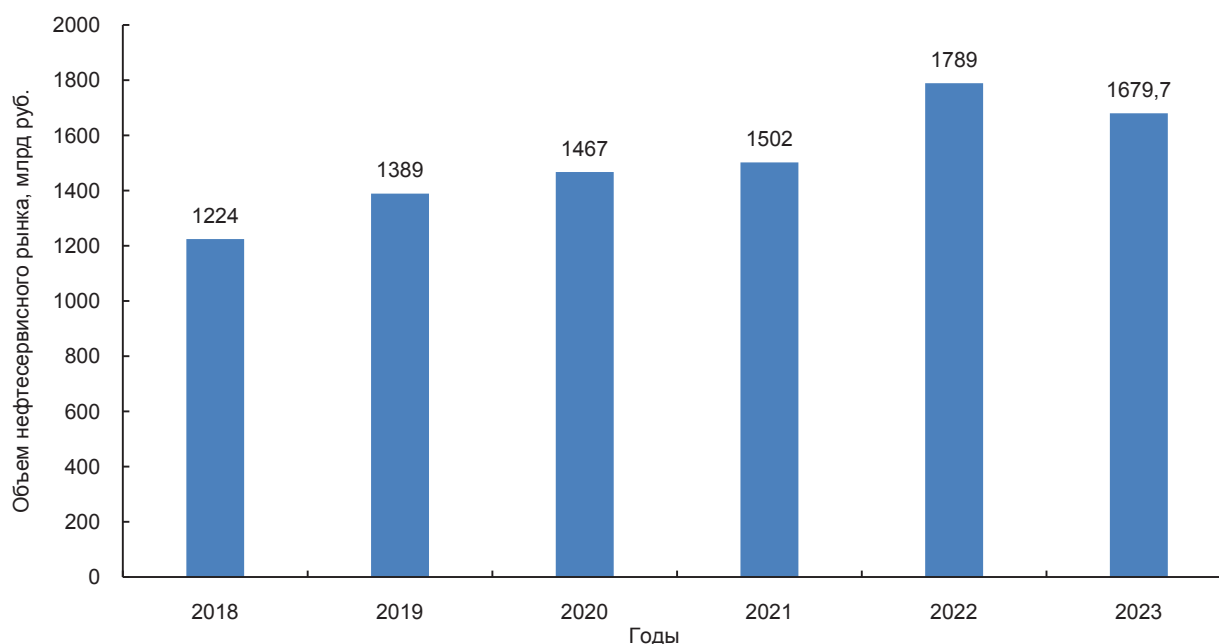


Рисунок 1. График изменения объемов российского нефтесервисного рынка с 2019 по 2022 г. – фактически, 2023 г. – прогноз. Составлено автором по материалам [6–8]

Figure 1. Graph of changes in the volumes of the Russian oilfield services market from 2019 to 2022 – in fact, 2023 – forecast. Compiled by the author based on materials from [6–8]



Рисунок 2. Основные проблемы российского нефтесервисного рынка [12]
Figure 2. Main problems of the Russian oilfield services market [12]

Объем погонных метров проходки в бурении (одно из основных направлений нефтесервисных услуг) увеличится с 27,5 млн м в 2022 г. до 28 млн м к 2030 г., а количество пробуренных скважин увеличится с 11,1 тыс. до 16,1 тыс. ед. Кроме того, наблюдается опережающий рост проходки в горизонтальной бурении, где прогнозируется увеличение количества пробуренных горизонтальных скважин до 10,9 тыс. ед. (на 85 %), что потребует значительного увеличения парка буровых установок. В настоящее время число буровых установок насчитывает около 1,5 тыс. ед., 40 % из которых находятся в состоянии морального и физического износа, поэтому для поддержания и увеличения темпов бурения парк буровых установок придется значительно обновлять [9].

В условиях дефицита современных нефтесервисных технологий, связанного с ужесточением санкционного режима на этапе перехода к модели экономики 4.0 (цифровизация) и возможной неспособностью российских компаний заместить их собственными разработками, рынок нефтесервисных услуг может оказаться в негативном сценарии [10]. Стагнация нефтесервисного рынка на уровне 18 млрд долл. в течение следующих пяти-семи лет может привести Россию к значительному снижению добычи углеводородов в 2030 г. – до 20 %.

В 2023 г. ожидается снижение добычи нефти в России на 10–15 % из-за санкций со стороны Запада, включая эмбарго на поставки нефти и нефтепродуктов на ключевой рынок Европейского Союза, а также ограничения цен на экспорт в третьи страны. Государственный бюджет Российской Федерации на 2023 г. предусматривает плановое сокращение производства нефти и газа на 8 % [11].

Основные проблемы, сдерживающие развитие рынка нефтесервисных услуг, представлены на рис. 2.

Рынок нефтесервисных услуг оказывается уязвимым из-за высокой концентрации высокотехнологичных услуг западных компаний и зависимости от импортного оборудования. Если эта ситуация не изменится, к 2030 г. страна может потерять до 20 % текущего уровня производства нефтесервисных услуг за счет отсутствия необходимых компетенций и оборудования в высокотехнологичном секторе нефтесервиса, который в рыночном отношении является наиболее дорогим и прибыльным сегментом нефтесервисного бизнеса. В свою очередь, под угрозой остановки могут оказаться ранее названные проекты освоения шельфовых и морских месторождений и залежей с труднодоступными или нетрадиционными залегами запасов углеводородов.

В таких условиях отрасль должна объединить свои усилия и запустить процесс полномасштабного импортозамещения, включая пересмотр механизма взаимодействия между добывающими и нефтесервисными компаниями. Это позволит уменьшить зависимость от иностранных поставщиков и развить внутренние технологические решения.

Для сокращения рисков и ускорения развития российского нефтесервисного рынка за период до 2030 г. требуется осуществить следующие меры [13]:

- утверждение перечня приоритетных технологий для развития отечественного сектора нефтесервисных услуг;
- согласование с нефтесервисными компаниями целевых объемов спроса и необходимых качественных параметров технологий, а также новой модели сотрудничества с российскими подрядчиками;

– согласование распределения мероприятий в рамках дорожной карты по формированию технологий и конкретных мер государственной поддержки для сегментов нефтесервисных услуг с нефтесервисными компаниями, производителями оборудования и подрядными организациями;

– введение специальных налоговых льгот для независимых российских нефтесервисных компаний и изменение механизма оплаты;

– создание условий для развития российской компонентной базы, что в перспективе позволит снизить риски и стоимость оборудования.

С внедрением этих мер РФ сможет к 2030 г. увеличить объем рынка нефтесервисных услуг до 24 млрд долл. и избежать потери 20 % добычи нефти и газа.

Развитие мирового нефтесервисного рынка характеризуется его миграцией между различными странами и регионами. Этот процесс осуществляется для поиска дополнительных возможностей повышения эффективности производства нефти и газа и продукции нефтехимического комплекса, прежде всего в направлении глубины переработки сырой нефти, обеспечивающей повышение выхода конечных продуктов с высокой добавленной стоимостью, а также организации новых рынков сбыта. Так, переработка нефти-сырца максимально близко к местам потребления уменьшает расходы на доставку продукции конечному пользователю. Здесь необходимо учитывать, что страны-потребители, не обладающие достаточными запасами углеводородов, прежде всего стремятся обеспечить надежные поставки сырой нефти из регионов добычи, чтобы осуществить ее переработку в соответствии с планами собственного экономического развития – на собственных нефтеперерабатывающих заводах, обеспечивая технологический прогресс и достижение наибольшего экономического результата. Характерный пример – политика Индии и КНР, крупнейших потребителей углеводородных ресурсов и локомотивов современной мировой экономики. Этим же объясняется и импорт сырой нефти странами-производителями нефти, например, США, которые, несмотря на значительные объемы собственной добычи, в большом количестве импортируют сырую нефть, впоследствии формируя большую часть экспорта из первичных нефтепродуктов. Напротив, экспорт стран Ближнего Востока в основном состоит из сырой нефти, что в первую очередь как раз и объясняется отсутствием потребительского рынка в регионе. Отдельно следует также отметить страны Содружества Независимых Государств (СНГ), которые традиционно обеспечиваются азербайджанской и российской нефтью и не зависят от импорта других стран [14].

Исследование практики развития мирового нефтесервиса дает нам успешные примеры развития отрасли в странах, где активно применялись государственные инструменты тарифного и нетарифного регулирования. Так, для китайского пути становления и развития нефтесервисного рынка характерно глобальное доминирование государства – практически все нефтесервисные активы находятся в собственности государственной Китайской национальной нефтегазовой корпорации (CNPC), которая является проводником государственной политики в

области нефтегазового сервиса, направленной на консолидацию разнородных малых сервисных предприятий, зачастую выходцев из «гаражных кооперативов», в высокотехнологичные холдинги, которые не только не испытывают проблем с финансированием передовых нефтесервисных разработок, но и способны оказывать производственные услуги нефтегазодобывающим компаниям как на внутреннем рынке, так и за пределами Китайской Народной Республики [15]. Названная особенность обеспечила КНР прорыв в группу государств-лидеров на рынке нефтесервисных услуг, и сегодня компании, входящие в корпорацию CNPC, обладают высоким уровнем конкурентоспособности в сейсморазведке, различных типах бурения, сопровождения (проводки) и испытаний скважин, скважиной геофизике, гидроразрывах пластов и повышении нефтеотдачи, строительстве трубопроводов, поставках нефтегазового оборудования и других специализированных видах нефтесервиса, что позволяет корпорации успешно расширять горизонты присутствия в различных странах мира.

В перечне основных инструментов, позволивших в достаточно короткие сроки достичь столь впечатляющих результатов в рамках реализации государственной политики КНР по развитию нефтесервисного рынка, следует назвать:

- инвестиции в НИОКР;
- массовые закупки образцов передового оборудования и технологий ведущих мировых компаний с целью изучения и производства аналогов собственной разработки;
- подготовка и развитие кадров для нефтесервисной отрасли;
- преференции национальным компаниям при участии в тендерах на поставку оборудования и сервисного сопровождения.

Транснациональные корпорации, базирующиеся на американском континенте, занимают лидирующие позиции на мировом нефтесервисном рынке, прежде всего из-за высокого уровня развития рынка в США и Канаде, который поддерживается путем:

- высокой конкуренции между компаниями, что способствует повышению качества услуг и снижению цен;
- поддержки малых независимых компаний, играющих важную роль в инновационных исследованиях и развитии новых технологий;
- широкого финансирования инновационных и венчурных проектов (стартапов), что способствует развитию новых решений и подходов в нефтесервисной отрасли;
- инвестирования значительных средств в научно-исследовательскую и опытно-конструкторскую работу (НИОКР);
- использования высокотехнологичного оборудования, которое позволяет эффективно выполнять различные виды работ в нефтесервисной отрасли;
- привлечения высококвалифицированного персонала с экспертизой и знаниями, что обеспечивает высокий уровень профессионализма и качества услуг.

При исследовании развития нефтесервисной отрасли в Норвегии к основным характерным чертам следует отнести:

- введение законодательных стандартов, требующих обязательного участия национальных компаний в нефте-

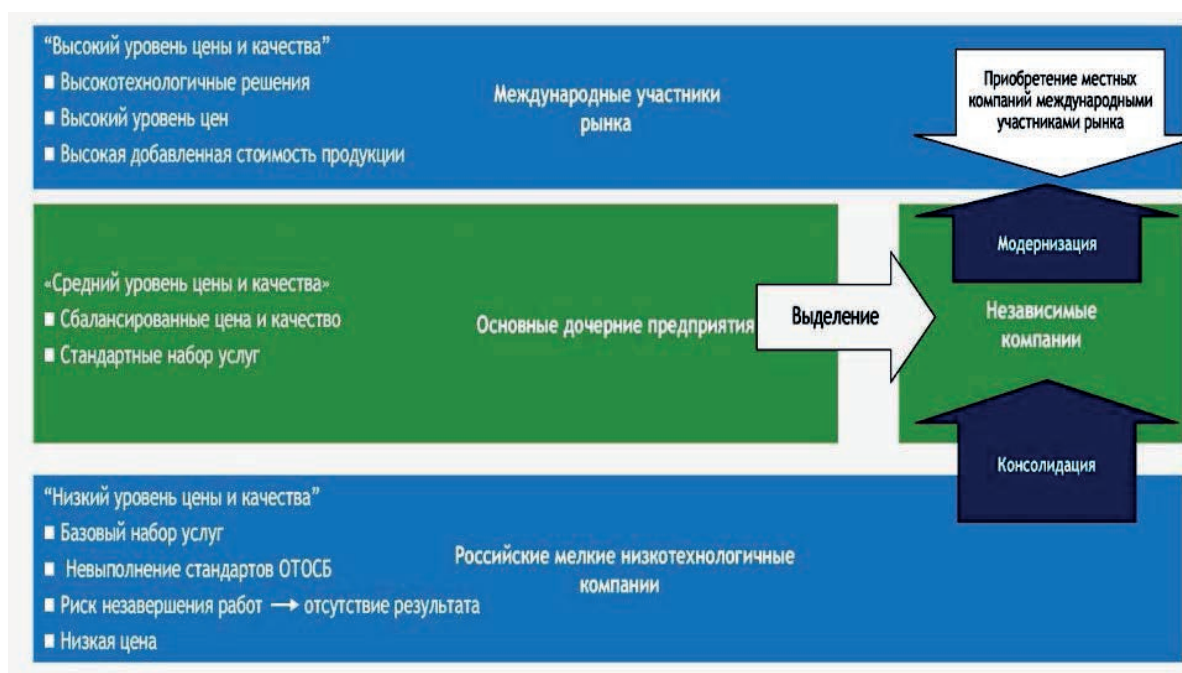


Рисунок 3. Тенденции изменения рынка нефтесервисных услуг [17]
Figure 3. Trends in the oilfield services market [17]

сервисных проектах, что способствует поддержке и развитию местного отраслевого бизнеса;

- лицензирование и квотирование названных стандартов, чтобы обеспечить соблюдение требований о национальном участии, для контроля и регулирования уровня участия национальных компаний на внутреннем рынке;

- стандарты устанавливают обязательную долю использования отечественного оборудования иностранными компаниями при работе на норвежском нефтесервисном рынке для стимуляции развития внутреннего отраслевого производства [16].

Суммируя сказанное, можно сделать выводы, что китайский подход свидетельствует о возможности получения значительной прибыли от экспансии на внешних рынках, тогда как американский опыт подтверждает эффективность налоговых, таможенных и правовых ограничений для защиты национальных рынков от нежелательного проникновения иностранных нефтяных и газовых корпораций.

Связанное с пандемией падение нефтяных котировок на мировых биржах вызвало рост конкуренции на рынках производителей нефти и газа, вследствие чего как на российском, так и на глобальном нефтесервисных рынках проявились две противоположные тенденции: с одной стороны, отмечается снижение спроса на эти услуги, с другой – данные о росте объемов бурения в России свидетельствуют о перспективах развития отрасли. Тенденции изменения рынка нефтесервисных услуг представлены на рис. 3.

Для решения проблем российского нефтесервисного рынка был основан государственный сервисный холдинг, целью которого было объединение профильных активов для консолидации и оптимизации мощностей с последующим эффективным оказанием услуг в нефтегазовой отрасли. Предполагается, что создание такой структуры обеспечивает формирующим холдинг компаниям доступ

к льготному кредитному финансированию и открывает возможности к инвестиционному развитию, также предусматриваются получение прямой господдержки для развития наукоемких высокотехнологичных услуг и вероятные преференции при заключении контрактов с государственными предприятиями. Также интеграция разрозненных нефтесервисных активов в единую структуру, объединяющую прикладную науку и производство, обеспечивает возможности для конкуренции с транснациональными корпорациями – лидерами в реализации высоких технологий на нефтесервисном рынке.

К выгодным последствиям формирования такой организации можно отнести [18]:

- рост капитализации входящих в государственный холдинг компаний, в том числе широкие возможности по дальнейшей консолидации и реализации сделок слияний и поглощений;

- повышение доходности от производственной деятельности за счет эффекта масштаба, прежде всего за счет синергетического эффекта, экономии затрат на управление и рационального использования ресурсов.

Одновременно при реализации решения о создании государственного сервисного холдинга следует учитывать возможные риски, связанные, прежде всего, со следующими негативными явлениями:

- присущий государственным структурам высокий уровень бюрократии в принятии управленческих решений и наличие коррупционной составляющей;

- избыточное вмешательство государства в экономические процессы («зарегулированность»);

- негативным следствием тендерных преференций может быть уменьшение конкуренции на нефтесервисном рынке в совокупности с более чем вероятным снижением качества услуг и вытеснением из бизнеса малых независимых компаний.

Для стимулирования развития рынка нефтесервисных услуг рекомендуется формирование технологических партнерств, объединяющих добывающие компании, сервисные компании, научно-исследовательские институты, университеты и бюро развития. Также важно вовлечение представителей государственных институтов власти для обеспечения необходимого взаимодействия и координации в форме частно-государственного партнерства, а также организации особых экономических зон со льготными режимами налогообложения и другими зависящими от государства решениями, стимулирующими экономическую деятельность. Одной из главных целей организации частно-государственных партнерств предусматривается совершенствование отечественных нефтесервисных технологий. В качестве дискуссии и дополнительных направлений настоящего исследования предлагается анализ механизмов и инструментов государственной, корпоративной и частной поддержки национального нефтесервисного рынка, а также изучение перспектив развития российских нефтесервисных компаний.

В соответствии с целью исследования был проведен анализ теоретических аспектов динамики развития нефтесервисного рынка, в результате которого были сделаны следующие выводы:

– волатильность цен на нефть и газ является одним из сдерживающих факторов роста нефтесервисного рынка из-за разрыва спроса и предложения, геополитики и ряда других факторов;

– растущий спрос на углеводороды и технологический прогресс являются фактором возможности роста нефтесервисного рынка; факторами роста рынка являют-

ся растущие объемы добычи нефти и газа, формирующие спрос на геологоразведку и нефтесервисное сопровождение. Кроме того, участники рынка ожидают технологических решений, которые могут помочь им повысить эффективность и производительность в отрасли, а также сократить затраты времени и труда;

– ключевые рыночные игроки в настоящее время концентрируются на реализации стратегий технологического развития, предусматривающих внедрение новых инновационных продуктов, а также использовании классических рыночных инструментов – слияний и поглощений, альянсов и партнерств, формирований совместных предприятий, чтобы обеспечить и улучшить свои рыночные позиции в мировой нефтесервисной индустрии.

Заключение

Таким образом, анализ возможностей, тенденций и проблем развития рынка нефтесервисных услуг, а также стратегических приоритетов нефтесервисных компаний на современном этапе подтверждает значимость и необходимость внедрения инновационных технологий для формирования и сохранения конкурентных преимуществ на существующем глобальном рынке. Эффективное внедрение инновационных технологий обеспечивается на основе модели стратегического инновационно-технологического планирования развития нефтесервиса, а также непрерывного мониторинга потребностей рынка нефтесервисных услуг.

Стратегический подход к моделированию развития нефтесервисных компаний позволяет повысить устойчивость и стабильность их развития, а также обеспечивает снижение негативного влияния на окружающую среду в условиях меняющегося энергетического ландшафта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Цыгалов Ю. М., Ординарцев И. И. Методы выявления стратегических альтернатив развития организации // Управленческое консультирование. 2016. № 4. С. 176–185.
2. Курс MBA по стратегическому менеджменту / М. Портер [и др.]. М.: Альпина Диджитал, 2007. 760 с.
3. Oilfield Services Market Size by Application (Offshore and Onshore), Type (Field Operation, Equipment Rental, and Analytical services), Service (Seismic Services, Drilling Services, Well Completion Equipment & Services, Processing & Separation Services, Production, and Subsea Services), Regions, Global Industry Analysis, Share, Growth, Trends, and Forecast 2022 to 2030. 235 p. URL: <https://www.thebrainyinsights.com/report/oilfield-services-market-12797>
4. Буренина И. В., Гайнуллин Т. Р. Перспективы стратегического планирования деятельности нефтесервисных предприятий // Экономика и управление: научно-практический журнал. 2020. № 6 (156). С. 72–76. <http://doi.org/10.34773/EU.2020.6.15>
5. Башаратьян М. М. Топливо-энергетический комплекс как одна из ключевых ресурсоснабжающих отраслей // Вестник МИРБИС. 2021. № 4 (28). С. 68–77. <http://doi.org/10.25634/MIRBIS.2021.4.7>
6. Нефтесервисный рынок России: фокус на диверсификацию // VYGON. Consulting. URL: https://vygon.consulting/upload/iblock/b7d/6ufuw6fwcjkavffecnonjbbmn1t03/vygon_consulting_OFS.pdf
7. Обзор рынка upstream и нефтесервиса 2022 // Kasatkin Consulting. URL: <https://kascons.ru/ofs2022>
8. Перспективы развития нефтесервисной отрасли в России до 2030 г. // Яков и Партнеры. URL: <https://yakov.partners/publications/russian-oilfield-service-industry>
9. Анисимова Я. А., Плотников В. А. Перспективы цифровой трансформации в нефтяной промышленности // Известия ЮЗГУ. Сер.: Экономика. Социология. Менеджмент. 2022. Т. 12. № 5. С. 106–119. <http://doi.org/10.21869/2223-1552-2022-12-5-106-119>
10. Антошкина А. В., Патлюк В. Ю. Обеспечение безопасности в условиях цифровой трансформации нефтегазовой промышленности ТЭК России // Современное состояние и перспективы обеспечения экономической независимости России: материалы II национ. науч.-практ. конф. Краснодар, 2020. С. 257–261.
11. Белошицкий А. В., Череповицын А. Е. К вопросу формирования сценариев устойчивого развития нефтесервисной отрасли // Вестник ЮРГПУ (НПИ). Сер.: Социально-экономические науки. 2022. Т. 15. № 2. С. 95–106. <http://doi.org/10.17213/2075-2067-2022-2-95-106>
12. Агафонов В. А. Стратегический менеджмент. Модели и процедуры. М.: Инфра-М, 2019. 350 с.
13. Андреев А. Ф., Синельников А. А., Петрушкин С. И., Булискерия Г. Н., Сергеева О. А. Нефтесервис в России: от технологических партнерств до бизнес-экосистем // Нефтяное хозяйство. 2020. № 7. С. 72–78. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2020-7-72-78>
14. Галушко М. В., Щетинина К. М. Обзор основных тенденций развития сервисных услуг в нефтегазовой отрасли // Наука, общество, образование в условиях цифровизации и глобальных изменений: сборник статей V Междунар. науч.-практ. конф. Пенза, 2022. С. 91–95. <https://elibrary.ru/cfiegeq>
15. Белошицкий А. В. Проблемы экономической устойчивости нефтесервисных компаний в условиях высокотурбулентной среды // Север и рынок: формирование экономического порядка. 2022. Т. 25. № 1 (75). С. 7–16. <https://doi.org/10.37614/2220-802X.1.2022.75.001>

16. Волошин В. И. Актуальные задачи нефтегазового комплекса России: вчера, сегодня, завтра // Экологический вестник России. 2019. № 2. С. 1–13. <https://elibrary.ru/vwbrpq>
17. Абрамова А. В., Гаранина О. Л. Влияние санкций на развитие российских ТНК в рамках глобальных цепочек стоимости (на примере энергетики и ИКТ) // Российский внешнеэкономический вестник. 2019. № 2. С. 35–48.
18. Антошкина А. В., Патлюк В. Ю., Телишева К. С. Перспективы формирования предпринимательских экосистем нефтегазовой отрасли в условиях цифровизации экономики // Экономика и предпринимательство. 2020. № 3 (116). С. 714–721. <https://doi.org/10.34925/EIP.2020.116.3.148>

Статья поступила в редакцию 15 сентября 2023 года

Current changes and strategical directions of modernization of oilfield services market

Timofey Alekseevich BELOSHITSKIY^{1*}
Vera Vital'evna BIRYUKOVA^{1,2**}

¹Ufa State Petroleum Technical University, Ufa, Russia

²Ufa Higher School of Economics and Management, Ufa, Russia

Abstract

Relevance. Innovative-technological development of oilfield service business is associated with the need of vertically integrated companies (VINCs) in services, which are largely dependent on fluctuations in demand for hydrocarbon raw materials, so the model of strategic planning of innovative-technological development of oilfield service, taking into account the current realities, will be in wide demand.

Purpose of the research – Justification of the need to implement the model of strategic planning in innovation and technological development in oilfield service companies based on the analysis of current problems and trends in the oilfield service market.

Main results. The analysis of problems and trends in the oilfield services market proves that the growing demand for hydrocarbons is the key factor determining the market growth and forming the outstripping demand for geological exploration, drilling and geophysical support. Increasing sanctions pressure may reduce the volume of high-tech service operations due to the withdrawal of multinationals from the Russian market, which may lead to stagnation of the oilfield services market and cause risks of lower oil and gas production levels. The pandemic-related drop in oil quotations on world stock exchanges has caused an increase in competition in both the Russian and global oilfield services markets, where two opposite trends have manifested themselves: on the one hand, there is a decline in demand for these services, while on the other – data on the growth of drilling volumes indicate the industry's development prospects. New technological solutions increase the production efficiency of the oilfield service industry, which requires companies to focus on innovative development and use a model of strategic planning for the introduction of modern technologies together with classical market instruments, which determines the practical significance of the results of this study.

Conclusion. The analysis of opportunities, trends and problems of oilfield service market development, as well as strategic priorities of oilfield service companies at the present stage confirms the significance and necessity of introducing innovative technologies to form and maintain competitive advantages in the existing global market. The strategic approach to modelling the development of oilfield service companies allows to increase the sustainability and stability of their development, as well as to reduce the negative impact on the environment in the changing energy landscape.

Keywords: oilfield services market, strategic planning, market modernization, analysis.


REFERENCES

1. Tsygalov Y. M., Ordinartsev I. I. 2016, Methods of identifying strategic alternatives for the development of the organization. *Upravlencheskoe konsul'tirovanie* [Management Consulting], no. 4, pp. 176–185.
2. Porter M. [et al.]. 2007, MBA course on strategic management. Moscow, 760 p.
3. Oilfield Services Market Size by Application (Offshore and Onshore), Type (Field Operation, Equipment Rental, and Analytical services), Service (Seismic Services, Drilling Services, Well Completion Equipment & Services, Processing & Separation Services, Production, and Subsea Services), Regions, Global Industry Analysis, Share, Growth, Trends, and Forecast 2022 to 2030. 235 p. URL: <https://www.thebrainyinsights.com/report/oilfield-services-market-12797>
4. Burenina I. V., Gainullin T. R. 2020, Perspectives of strategic planning of oilfield service enterprises. *Ekonomika i upravlenie: nauchno-prakticheskiy zhurnal* [Economics and Management: scientific and practical journal], no. 6 (156), pp. 72–76. <http://doi.org/10.34773/EU.2020.6.15>
5. Basharat'yan M. M. 2021, Fuel and energy complex as one of the key resource-supplying industries. *Vestnik MIRBIS* [MIRBIS Bulletin], no. 4 (28), pp. 68–77. <http://doi.org/10.25634/MIRBIS.2021.4.7>
6. Oilfield service market of Russia: focus on diversification. VYGON. Consulting. URL: https://vygon.consulting/upload/iblock/b7d/16ufuw6fwcjka-vffecncnjbmn1t03/vygon_consulting_OFS_.pdf
7. Review of upstream and oilfield services market 2022. Kasatkin Consulting. URL: <https://kascons.ru/ofs2022>
8. Prospects of development of oilfield service industry in Russia until 2030. Yakov and Partners. URL: <https://yakov.partners/publications/russian-oilfield-service-industry>

✉ Mohax45@gmail.com

 <https://orcid.org/0009-0008-6590-8892>

**v.birukova@yandex.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-0986-7087>

9. Anisimova Y. A.; Plotnikov V. A. 2022, Prospects of digital transformation in the oil industry. *Izvestiya YUZGU. Seriya Ekonomika. Sotsiologiya. Menedzhment* [Proceedings of the Southwest State University. Series: Economics. Sociology. Management], vol. 12, no. 5, pp. 106–119. <http://doi.org/10.21869/2223-1552-2022-12-5-106-119>
10. Antoshkina A. V., Patlyuk V. Y. 2020, Ensuring security in the conditions of digital transformation of the oil and gas industry of the fuel and energy complex of Russia. Modern state and prospects of ensuring the economic independence of Russia: Proceedings of the II national scientific-practical conference. Krasnodar, pp. 257–261. <https://elibrary.ru/cvdbfg>
11. Beloshitskiy A. V., Cherepovitsyn A. E. 2022, To the issue of forming scenarios of sustainable development of oilfield service industry. *Vestnik YURGPU (NPI). Seriya Sotsial'no-ekonomicheskie nauki* [Bulletin of South-Russian State Polytechnical University (NPI). Series: Socio-economic sciences], vol. 15, no. 2, pp. 95–106. <http://doi.org/10.17213/2075-2067-2022-2-95-106>
12. Agafonov V. A. 2019, Strategic Management. Models and procedures. Moscow, 350 p.
13. Andreev A. F., Sinelnikov A. A., Petrushkin S. I., Buliskeria G. N., Sergeeva O. A. 2020, Nefteservice in Russia: from technological partnerships to business ecosystems. *Neftyanoye khozyaistvo* [Oil Industry], no. 7, pp. 72–78. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2020-7-72-78>
14. Galushko M. V., Shchetinina K. M. 2022, Review of the main trends in the development of services in the oil and gas industry. Science, society, education in the conditions of digitalisation and global changes: collection of articles of the V International Scientific and Practical Conference. Penza, pp. 91–95. <https://elibrary.ru/cfieq>
15. Beloshitskiy A. V. 2022, Problems of economic stability of oilfield service companies in a highly turbulent environment. *Sever i rynek: formirovaniye ekonomicheskogo poryadka* [North and market: formation of economic order], vol. 25, no. 1 (75), pp. 7–16. <https://doi.org/10.37614/2220-802X.1.2022.75.001>
16. Voloshin V. I. 2019, Actual tasks of the oil and gas complex of Russia: yesterday, today, tomorrow. *Ekologicheskiiy vestnik Rossii* [Ecological Bulletin of Russia], no. 2, pp. 1–13. <https://elibrary.ru/vwbrpq>
17. Abramova A. V., Garanina O. L. 2019, Impact of sanctions on the development of Russian TNCs in the global value chains (by the example of energy and ICT). *Rossiiskiy vneshneekonomicheskiiy vestnik* [Russian foreign economic bulletin], no. 2, pp. 35–48.
18. Antoshkina A. V., Patlyuk V. Y., Telisheva K. S. 2020, Prospects for the formation of entrepreneurial ecosystems of the oil and gas industry in the conditions of digitalisation of the economy. *Ekonomika i predprinimatel'stvo* [Economics and Entrepreneurship], no. 3 (116), pp. 714–721. <https://doi.org/10.34925/EIP.2020.116.3.148>

The article was received on September 15, 2023

Дискуссионный клуб Discussion club

УДК 551.582.2

<http://doi.org/10.21440/2307-2091-2023-4-164-169>

Анализ грозовой активности на территории Ирака и Турции

Имад Абдулриза АЛЬ-ХУЛАЙФАВИ*
Александр Рувимович ИОШПА**

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

Аннотация

Актуальность работы. В статье рассматривается анализ грозовой активности на территории Ирака и Турции. Выполнено сопоставление грозовой активности в районах 5 метеостанций, расположенных в разных районах на территории двух государств. Анализ накопленных данных показал, что частота гроз над разными регионами мира во многом зависит от их географического положения (топография), расстояния от моря и времени года.

Цель работы – выявление особенностей пространственного распределения тенденций межгодовой изменчивости и определение наилучших зарегистрированных месяцев грозовой активности в течение года над территорией Ирака и Турции.

Методы проведения работы. Исследование проводилось на основе анализа ежедневных (архивных) метеорологических данных о грозовых явлениях за 10 лет (2009–2019) на пяти метеорологических станциях.

Результаты работы. В данной статье проанализирована грозовая активность по архивным данным ежедневных метеорологических наблюдений за 10-летний период на трех метеорологических станциях, расположенных в разных климатических зонах Ирака, и на двух метеорологических станциях, расположенных в разных климатических зонах Турции. Анализ показал, что наибольшая повторяемость гроз приходится на март и апрель, из них 55 % приходится на северную горную часть Ирака. Но в Турции анализ показал, что наибольшая повторяемость гроз приходится на апрель и май, из них 54 % приходится на юго-восток от Анатоллии из-за высоты над уровнем моря.

Выводы. В северных и северо-восточных регионах Ирака и юго-восточном регионе Турции наблюдалась интенсивная грозовая активность. В марте, апреле и мае наблюдалась самая высокая годовая частота гроз.

Ключевые слова: гроза, Ирак, Турция, конвективная облачность, грозовая активность, дефицит осадков.

Введение

Турбулентность обычно возникает вблизи поверхности Земли почти непрерывно в течение дня и относительно уменьшается в течение ночи. Было замечено, что турбулентность возникает вне облаков на 20 % ниже высоты 12 км, а выше этого турбулентность возникает с меньшей скоростью на 2 % вблизи высоты 17 км. Причина турбулентности воздуха в свободной атмосфере аналогична той, что возникает у поверхности Земли, например, конвекция и вертикальные сдвиговые ветры [1].

Вызванная вихревыми потоками ветра, нисходящими и исходящими, турбулентность воздуха проявляется в виде пульсаций скорости и направления ветра как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскостях. При полете в турбулентной зоне движение воздушного судна (ВС) становится возмущенным, оно испытывает на себе скачки скорости, изменение угла атаки и крен, также оно подвергается колоссальным нагрузкам, колебаниям центра тяжести, а также угловым колебаниям [2].

Грозы из-за тепловой турбулентности. Основным источником тепловой турбулентности в атмосфере являются конвективные течения, а одной из распространенных форм турбулентного движения является тепловая турбулентность, к которой относятся колебания вертикальной скорости воздуха, обусловленные силой плавучести. Тепловые турбулентности возникают в результате развития и усиления конвекции в атмосфере. Вертикальные смещения воздуха происходят из-за разницы между ее плотностью и плотностью окружающего воздуха (рис. 1) [3].

Грозы из-за фронтальной воздушной турбулентности. Воздушные фронты, сопровождающие системы низкого давления, могут вызывать среднюю или сильную турбулентность в зависимости от ряда факторов, наиболее важными из которых являются сила фронта, его скорость или сдвиг ветра вдоль фронта. Фронты имеют скорость движения поверхности 15 м/с и более. Фронты, имеющие значительные сдвиги ветра или сдвиговые ветры, часто сопровождаются

*imadjasim900@gmail.com

**aioshpa@sfnedu.ru

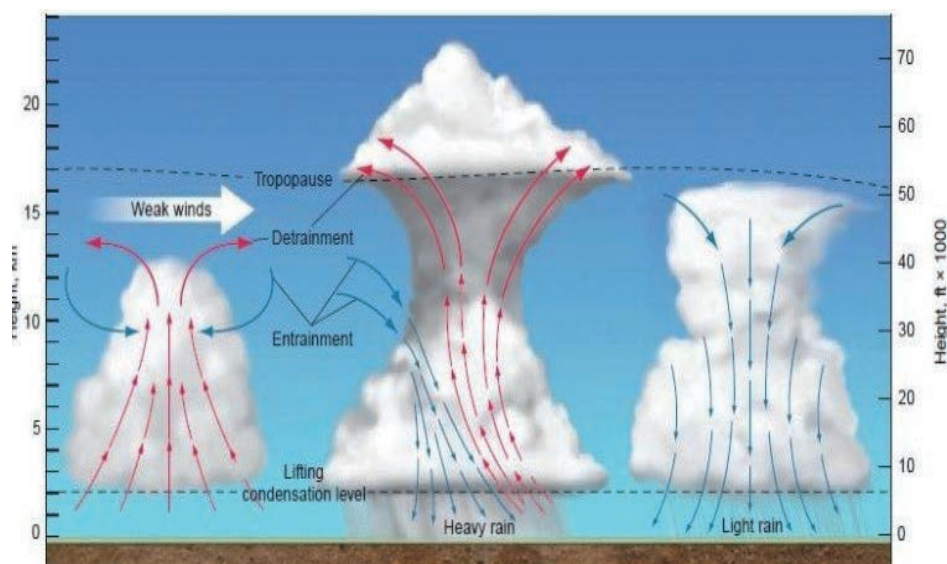


Рисунок 1. Грозы, вызванные тепловой конвекцией [4]
Figure 1. Thunderstorms caused by thermal convection [4]

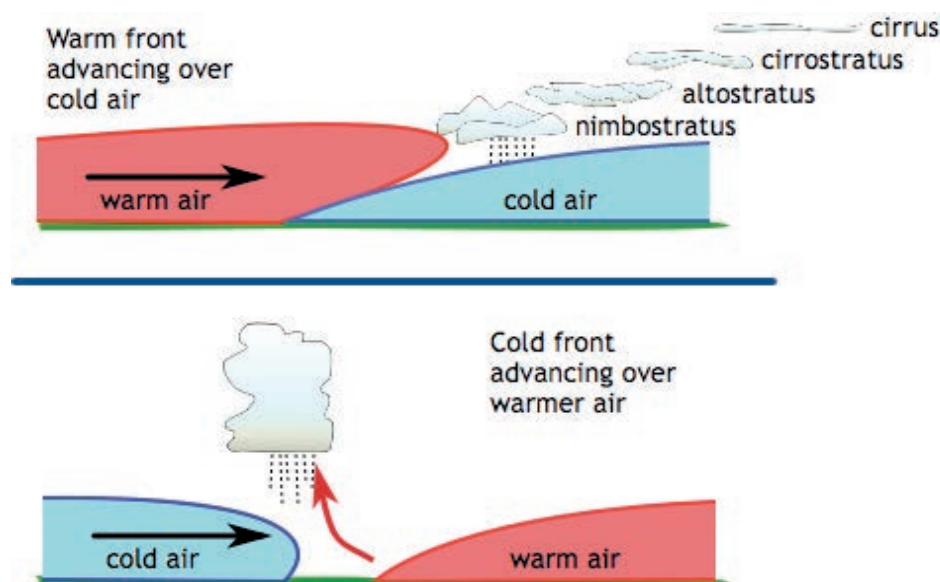


Рисунок 2. Грозы, вызванные холодными и теплыми фронтами [6]
Figure 2. Thunderstorms caused by cold and warm fronts [6]

конвективной деятельностью, что делает их опасными для самолета, и это вызвано подъемом теплого воздуха, движением холодного фронта. Большинство сильных турбулентностей вызвано быстрым движением холодного фронта, содержащего большое количество влаги (рис. 2) [5].

Материалы и методы исследований

Своеобразное географическое расположение Ирака характеризует его климат. Различные типы местности Ирака охватывают горные районы на севере и северо-востоке Ирака, холмистые районы к югу от горного района, аллювиальные равнины и западные плато. Расположение этих районов, в зависимости от высоты над уровнем моря, играет важную роль в формировании различных климатических условий в разных регионах Ирака. Поэтому при направлении с юга на север температура падает и увеличивается количество дождей [7].

Ирак имеет своеобразный климат, обусловленный его положением в месте встречи средиземноморских и континентальных воздушных масс и барьерным эффектом его гор, которые создают условия для формирования конвективной облачности в течение года.

В Турции континентальный климат. Зима очень холодная и снежная, а лето довольно жаркое и сухое из-за равнинных и пустынных ветров, дующих с юга. Юго-Восточная Анатолия испытывает огромные уровни испарения в течение долгого и сухого лета и является самой засушливой частью Турции [8]. Средиземноморский климат распространен в Средиземноморье, на Эгейском море. Летом климат жаркий и засушливый, а зимой теплый и дождливый.

В конце весны и начале лета в средних широтах, включая Турцию, активные циклоны и широкие слоис-

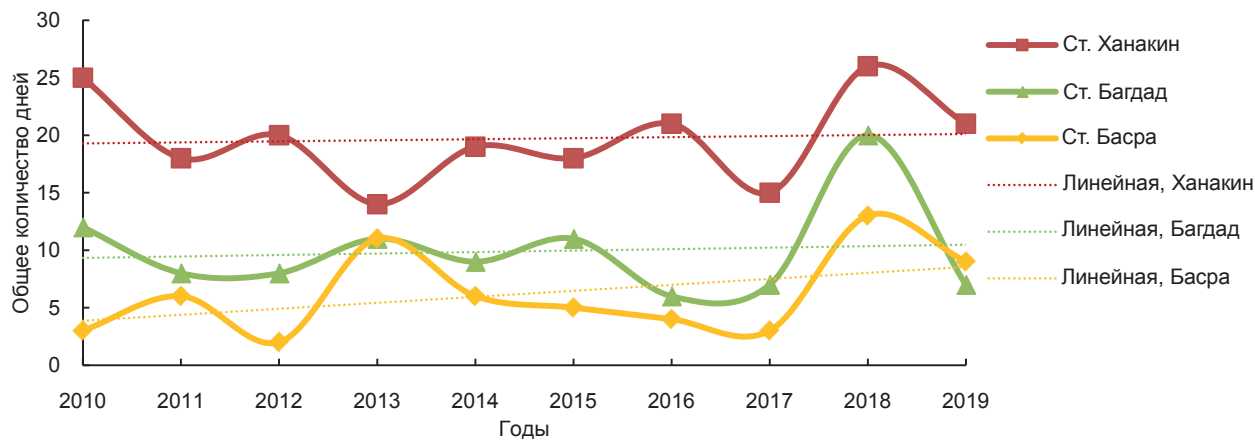


Рисунок 3. Распределение общего количества гроз по годам за 10 лет в Ираке
Figure 3. Distribution of the total number of thunderstorms by year over 10 years in Iraq

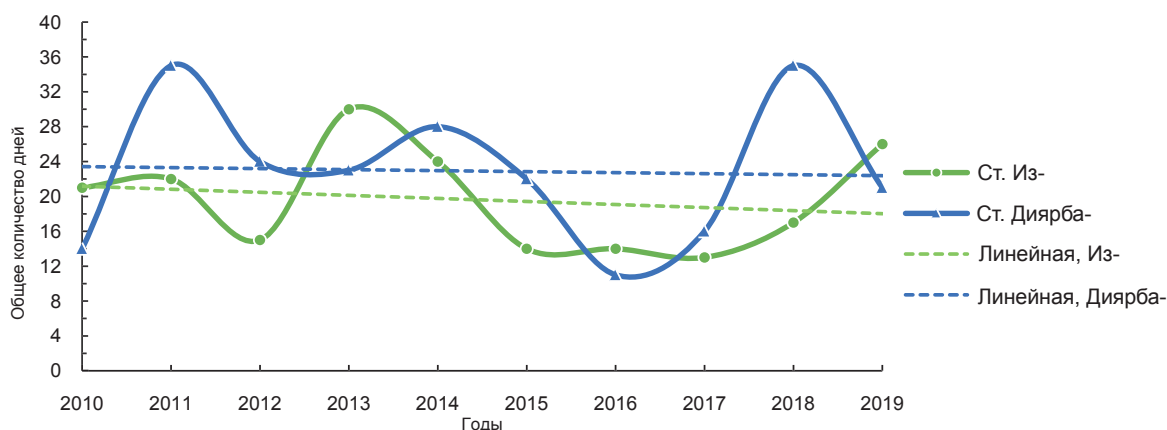


Рисунок 4. Распределение общего количества гроз по годам за 10 лет в Турции
Figure 4. Distribution of the total number of thunderstorms by year over 10 years in Turkey

тые облака сменяются мелкомасштабными движениями воздуха и конвективными дождями, вызванными вертикально растущими конвективными облаками [9].

Исследование проводилось на основе анализа ежедневных (архивных) метеорологических данных о грозовых явлениях за 10 лет на трех метеорологических станциях (Ханакин, аэропорт Багдада и аэропорт Басры) за период 2010–2019 гг. [10]. Для Турции данные о грозовых явлениях за 10 лет на двух метеорологических станциях (аэропорт Диярбакыра и аэропорт Измира) за период 2010–2019 гг. взяты с tutiempo.net [11] и meteologix.com [12]. Ряды данных были проверены на предмет их качества и непрерывности записей. Осуществлен экспертный контроль качества данных.

На всех пяти метеорологических станциях были проанализированы случаи с грозами (баротропный или бароклинический). В качестве базового показателя грозовой активности принят день с грозой. Для определения дня с грозой использовались следующие критерии:

- сутки, когда была зафиксирована гроза (в районе станции или отдаленная), включающие интервал времени с 00 : 00 до 24 : 00 ч по местному времени, по срокам наблюдений 00.00; 06.00; 12.00 и 18.00 ч;

- если гроза происходила в ночное время в период перехода суток, она включалась в оба дня, т. е. фиксировались два дня с грозой.

Полученные данные были статистически обработаны, сформированы в таблицы и включают в себя ежедневное, ежемесячное и годовое количество дней с грозами на каждой станции.

Краткий статистический анализ был применен для оценки изменчивости и возможных различий в среднем числе дней, по крайней мере, с одним грозовым событием из долгосрочных рядов данных в каждом регионе. Статистическая значимость их изменений была рассчитана тестом Манна–Кендалла для всего периода 2010–2019 гг. [13].

Результаты исследований и их обсуждение

Временная изменчивость суммарного числа дней с грозами на территории Ирака по трем метеостанциям представлена на графике (рис. 3) за 10-летний период. Результаты анализа показывают, что наибольшее количество дней с грозами за рассматриваемый период приходится на горные районы, где расположена станция Ханакин, – 197 дней, наименьшая повторяемость наблюдалась в районе Персидского залива на метеостанции аэропорта Басры – 62 дня.

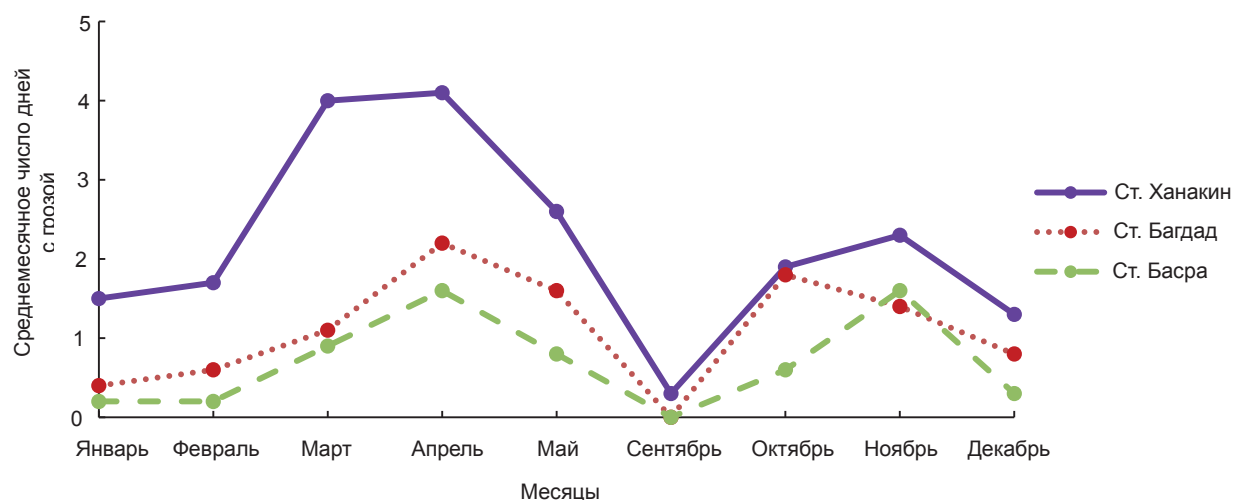


Рисунок 5. Среднемесячное число дней с грозой за период с 2010 по 2019 г. в Ираке
Figure 5. Average monthly number of days with thunderstorms for the period from 2010 to 2019 in Iraq

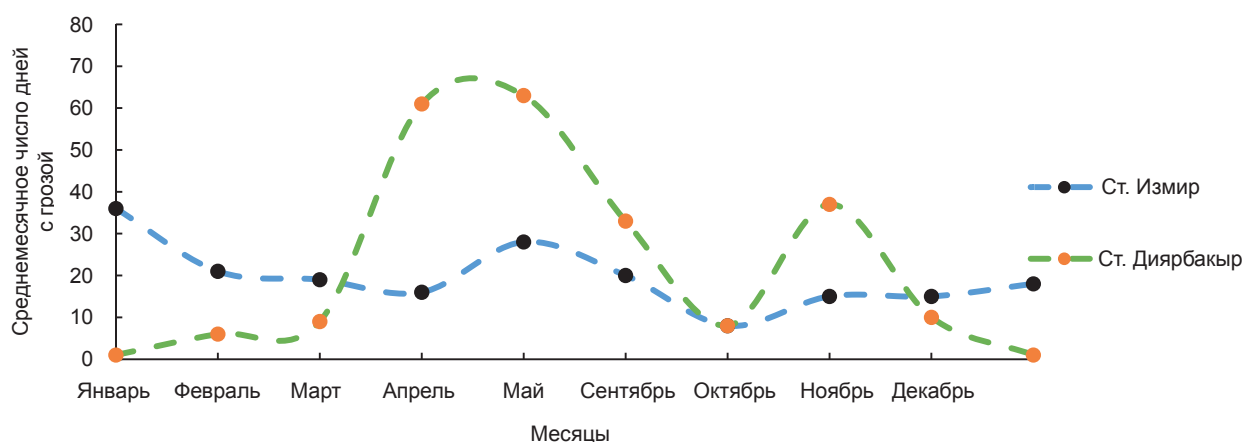


Рисунок 6. Среднемесячное число дней с грозой за период с 2010 по 2019 г. в Турции
Figure 6. Monthly average number of days with thunderstorms for the period 2010 to 2019 in Turkey

Как видно из графика (рис. 3), за исследуемый период на территории Ирака наблюдается положительный тренд количества дней с грозами с максимумом повторяемости в 2018 г., явное увеличение количества гроз на всех станциях.

На графике (рис. 4) показан временной ход общего количества дней с грозами над территорией Турции для двух метеостанций за период 10 лет. Результаты анализа показывают, что наибольшее количество дней, сопровождающихся грозами, за исследуемый период приходится на горные районы, где расположена станция аэропорта Диярбакыра, – 229 дней, а наименьшая повторяемость наблюдается в Эгейском море на метеостанции аэропорта Измира – 196 дней.

В течение исследуемого периода отчетливо наблюдалась тенденция к снижению, а затем к увеличению числа дней, сопровождавшихся грозами (в последние пять лет периода), как видно из графика (рис. 4).

Анализ среднемесячного числа дней с грозами за 10-летний период (с 2010 по 2019 г.) на всех станциях в Ираке показал, что обычно максимальная повторяемость грозовой активности приходится на период весны

с марта по май около 52,8 % всех гроз, а второй всплеск активности наблюдается в период октябрь–ноябрь 26,8 % (рис. 5).

Максимальная грозовая активность наблюдается в апреле (максимум 8 дней на станции в Ханакине) в северной и северо-западной части страны в горной местности из-за преобладающих топографических условий для конвективной инициации.

В летний период гроз на всей территории Ирака не наблюдалось, а в сентябре они наблюдаются крайне редко, в среднем 1–2 случая за пятилетие на станции в Ханакине. Средняя максимальная температура воздуха составляет более +40 °С в течение четырех месяцев теплого периода года (с июня по сентябрь включительно). Повторяемость дней с грозами увеличивается в октябре и ноябре в среднем до 3–4 случаев. С декабря по февраль грозы – достаточно редкое явление, их повторяемость в январе–феврале не превышает 1–2 случаев за пятилетие, а в декабре грозы наблюдаются крайне редко – три случая за 10 лет на метеостанции аэропорта Басры [14].

Анализ среднемесячного числа дней с грозами за 10-летний период (с 2010 по 2019 г.) на всех станциях в

Турции показал, что обычно около 52 % всех гроз приходилось на период апрель–июнь, но на период октябрь–ноябрь 18,1 % (рис. 6).

Максимальная грозовая активность наблюдается в мае (максимум 15 дней на станции аэропорта Диярбакыра). Количество дней увеличивалось в юго-восточной Анатолии, в горной местности, из-за преобладающих топографических условий для конвективной инициации.

В летний период грозы на всей территории Турции наблюдались редко, а в сентябре они наблюдаются крайне редко, в среднем 1–2 случая. Повторяемость дней с грозами увеличивается в октябре и ноябре в среднем до 3–4 случаев. На станции аэропорта Измира с декабря по февраль гроз наблюдается в среднем 3–4 случая, а в марте в среднем 2 случая. На станции аэропорта Диярбакыра в декабре и январе грозы наблюдаются крайне редко – один случай за 10 лет, в феврале и марте – достаточно редко, в среднем до 1–2 случаев.

Формирование грозы в Ираке и Турции в основном зависит [8]:

- от дифференциального нагрева;
- топографии;
- расстояния от моря;
- системы атмосферного фронта.

Заключение

Основываясь на анализе частоты гроз в исследуемом районе, можно сделать следующие выводы.

1. Количество грозовых дней за 10-летний период исследования на территории Ирака увеличилось. На метеорологической станции в Ханакине – 26 дней, на станции аэропорта Багдада – 20 дней, а на станции аэропорта Басры – 13 дней в 2018 г. Пыльные и песчаные бури часто возникали при сухих грозах в летнее время года.

2. За исследуемый 10-летний период на территории Турции в 2013 г. на метеорологической станции аэропорта Измира было зафиксировано максимальное количество грозовых дней – 30, в то время как на метеорологической станции в аэропорту Диярбакыра максимум дней с грозовой активностью (35) было зафиксировано в 2011 и 2018 гг.

3. В районах Турции грозы возникают чаще, чем в Ираке, это объясняется наличием более интенсивной циклонической деятельностью и связанными с ней холодными атмосферными фронтами, орографией местности и близостью Черного и Средиземного морей.

4. Пиковыми месяцами грозовой активности на исследуемой территории являются март, апрель и май. Сильные весенние грозы распространились на северные и северо-восточные районы Ирака и юго-восточный регион по всей Анатолии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Panofsky H., Dutton J. Atmospheric Turbulence: models and methods for engineering applications. N. Y.: John Wiley and Sons Inc., 1984. 397 p.
2. Mozan A. A. Analytical study of turbulence over Baghdad city. Baghdad, Iraq: Al-Mustansiriyah University, College of Science, 2011. 71 p.
3. Vinnichenko N. K., Pinus N. Z., Shmeter S. M., Shur G. N. Turbulence in The Free Atmosphere. Second Edition. Central Aerological Observatory Dolgoprudnyi, USSR. N. Y.: Consultants Bureau, 1980. 310 p.
4. Thunderstorms // Geography. URL: <https://geography.name/thunderstorms-2/>
5. Air Traffic Controller. NAVEDTRA 14342. Naval Education and Training Professional Development and Technology Center, 2003. 594 p.
6. Clouds Form Due to Weather Fronts / UCAR center for science education. URL: <https://scied.ucar.edu/image/cloud-form-weather-fronts>
7. Авад В. Р. Динамика изменения ландшафтов в условиях опустынивания сельскохозяйственных земель (на примере юга Ирака): дис. ... канд. геогр. наук. СПб, 2019. 170 с.
8. Climate change in Turkey. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Climate_change_in_Turkey
9. Kahya C., Kadioglu M. Thunderstorm Activities over Turkey. Istanbul, Turkey: Istanbul Technical University, Department of Meteorology, 2013. 31 p.
10. Data from the Iraqi General Authority for Meteorology and Seismic Monitoring / Department of Climate and Scientific Research, unpublished data, 2023. URL: <http://meteoseism.gov.iq/>
11. Climate data: Turkey. URL: <https://en.tutiempo.net/climate/turkey.html>
12. Weather for Turkey. URL: <https://meteologix.com/tr>
13. Robaa S. M., Al-Barazanji Z. J. Mann-Kendall trend analysis of surface air temperatures and rainfall in Iraq // Quarterly Journal of Hungarian Meteorological Service. 2015. Vol. 119. No. 4. P. 493–514.
14. Иошпа А. Р., Аль-Хулайфави И. А. Д. Анализ грозовой активности на территории Ирака // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Сер.: Естественные науки. 2023. Т. 218. № 2. С. 75–80. <http://doi.org/10.18522/1026-2237-2023-2-75-80>
15. Husseini K. F. Indicators of climate change and environmental impact in Iraq. Baghdad, 2012. 274 p.

Статья поступила в редакцию 24 июля 2023 года

Analysis of Thunderstorm Activity in Iraq and Turkey

Imad Abdulridha Al-KHULAIFAWI*
Aleksandr Ruvimovich IOSHPA**

Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

Abstract

Relevance of the work. The article deals with the analysis of thunderstorm activity in Iraq and Turkey. A comparison of thunderstorm activity in the areas of location of 5 weather stations located in different areas on the territory of the two states was carried out. Analysis of the accumulated data showed that the frequency of thunderstorms over different regions of the world largely depends on their geographical location (topography), distance from the sea and time of year.

The purpose of the work. The aim was to identify the features of the spatial distribution of trends in interannual variability and to determine the best recorded months of thunderstorm activity during the year over the territory of Iraq and Turkey.

Methods of work. The study was conducted based on the analysis of daily (archived) meteorological data on thunderstorms over 10 years at five meteorological stations.

Results. Based on historical data of daily meteorological observations made over a ten-year period at three meteorological stations in various climate zones in Iraq and at two meteorological stations in various climate zones in Turkey, this study analyzes thunderstorm activity. According to the data, March and April have the highest frequency of thunderstorms, with 55% of them occurring in Iraq's northern highland region. However, the study found that in Turkey, April and May had the highest frequency of thunderstorms, with 54% of them occurring in Anatolia's south-east because of its elevation above sea level.

Conclusions. In the northern and northeastern regions of Iraq and the southeastern region of Turkey, intense thunderstorm activity was observed. March and April saw the highest annual frequency of thunderstorms.

Keywords: thunderstorm, Iraq, Turkey, convective cloudiness, thunderstorm activity, precipitation deficit.

REFERENCES

1. Panofsky H., Dutton J. 1984, Atmospheric Turbulence: models and methods for engineering applications. N. Y.: John Wiley and Sons Inc., 397 p.
2. Mozan A. A. 2011, Analytical study of turbulence over Baghdad city. Baghdad, Iraq: Al-Mustansiriyah University, College of Science, 71 p. (In Arabic).
3. Vinnichenko N. K., Pinus N. Z., Shmeter S. M., Shur G. N. 1980, Turbulence in The Free Atmosphere. Second Edition. Central Aerological Observatory Dolgoprudnyi, USSR. N. Y.: Consultants Bureau, 310 p.
4. Thunderstorms. Geography. URL: <https://geography.name/thunderstorms-2/>
5. 2003, Air Traffic Controller. NAVEDTRA 14342. Naval Education and Training Professional Development and Technology Center, 594 p.
6. Clouds Form Due to Weather Fronts / UCAR center for science education. URL: <https://scied.ucar.edu/image/cloud-form-weather-fronts>
7. Awad W. R. 2019, Landscape Dynamics in The Desertification of Agricultural Land (exemplified by southern Iraq). PhD thesis. Petersburg: 170 p.
8. Climate change in Turkey. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Climate_change_in_Turkey
9. Kahya C., Kadioglu M. 2013, Thunderstorm Activities over Turkey. Istanbul, Turkey: Istanbul Technical University, Department of Meteorology, 31 p.
10. 2023, Data from the Iraqi General Authority for Meteorology and Seismic Monitoring / Department of Climate and Scientific Research, unpublished data. URL: <http://meteoseism.gov.iq/>
11. Climate data: Turkey. URL: <https://en.tutiempo.net/climate/turkey.html>
12. Weather for Turkey. URL: <https://meteologix.com/tr>
13. Robaa S. M., Al-Barazanji Z. J. 2015, Mann-Kendall trend analysis of surface air temperatures and rainfall in Iraq. *Quarterly Journal of Hungarian Meteorological Service*, vol. 119, no. 4, pp. 493–514.
14. Ioshpa A. R., Al-Khulaifawi I. A. D. 2023, Analysis of thunderstorm activity in Iraq Proceedings of higher educational institutions. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region* [North Caucasus region. Series: Natural Sciences], vol. 218, no. 2, pp. 75–80. <http://doi.org/10.18522/1026-2237-2023-2-75-80>
15. Hussein K. F. Indicators of climate change and environmental impact in Iraq. Baghdad, 2012. 274 p.

The article was received on July 24, 2023

*imadjasim900@gmail.com
**aiosha@sfsu.ru

История горного дела

<http://doi.org/10.21440/2307-2091-2023-4-170-180>

Федор Иванович Рукавишников (1902–1942) и бывший рукавишниковит (ныне тернесит)

Fedor Ivanovich Rukavishnikov (1902–1942) and former rukavishnikovite (now ternesite)

Юрий Алексеевич ПОЛЕНОВ*
Софья Игоревна ШЕВЕЛЕВА

Yuriy Alekseevich POLENOV*
Sof'ya Igorevna SHEVELEVA

Уральский государственный горный университет,
Екатеринбург, Россия

Ural State Mining University,
Ekaterinburg, Russia

*Polenov_yu@mail.ru;
fgg.gl@ursmu.ru

*Polenov_yu@mail.ru;
fgg.gl@ursmu.ru

Аннотация

Федор Иванович Рукавишников – крупный специалист в области минералогии Урала. Автор первого уральского определителя минералов по внешним признакам. Он проработал в Свердловском горном институте с 1925 по 1937 г. и последовательно являлся ассистентом, доцентом кафедры минералогии, а также был проректором и ректором. В 1937 г. уехал работать в Москву, в Институт геологических наук АН СССР. В 1941 г. ушел в московское ополчение, попал в плен и погиб в концлагере в 1942 г. В честь Федора Ивановича был назван новый минерал – рукавишниковит, который был обнаружен Б. В. Чесноковым в горелых отвалах Челябинского угольного бассейна. Международная минералогическая ассоциация не утвердила его в качестве нового минерального вида, а спустя несколько лет в Германии был найден природный аналог рукавишниковита – тернесит.

Ключевые слова: Ф. И. Рукавишников, биография, рукавишниковит, тернесит, минералогия, Челябинский угольный бассейн.

Abstract

Fedor Ivanovich Rukavishnikov is a major specialist in the field of mineralogy of the Urals. Author of the first Ural identification of minerals based on external characteristics. He worked at the Sverdlovsk Mining Institute from 1925 to 1937 and was successively an assistant, associate professor of the Department of Mineralogy, and also served as vice-rector and rector. In 1937 he went to Moscow to work at the Institute of Geological Sciences of the Academy of Sciences USSR. In 1941 he joined the Moscow militia, was captured and died in a concentration camp in 1942. A new mineral was named in honor of Fyodor Ivanovich – rukavishnikovite, which was discovered by B.V. Chesnokov in the burnt dumps of the Chelyabinsk coal basin. The International Mineralogical Association did not approve it as a new mineral species, and a few years later a natural analogue of rukavishnikovite, ternesite, was found in Germany.

Keywords: F. I. Rukavishnikov, biography, rukavishnikovite, ternesite, mineralogy, Chelyabinsk coal basin.

Федор Иванович Рукавишников (фото 1) являлся крупным специалистом в области минералогии Урала. Автор первого уральского определителя минералов по внешним признакам. Он проработал в Свердловском горном институте с 1925 по 1937 г. и последовательно являлся ассистентом, доцентом кафедры минералогии, а также был проректором и ректором. В 1937 г. уехал в Москву, в докторантуру Института геологических наук АН СССР. В 1941 г. ушел в московское ополчение, попал в плен и погиб в концлагере в 1942 г.

О Федоре Ивановиче написано очень мало в открытой литературе [1–3], поэтому авторы постарались дать полную биографию преподавателя и ученого.

Федор Иванович Рукавишников родился 25 февраля 1902 г. в селе Тюбук Екатеринбургского уезда Пермской губернии (ныне север Челябинской области) в крестьянской семье. Отец Иван Николаевич был кузнецом, а мама Ульяна Григорьевна – домохозяйкой. В 1930-х гг. они вступили в колхоз и оба пережили своего сына (отец умер в 1949 г., а мать – в 1970 г.). В семье было четверо детей – Федор, самый старший, и три младшие сестренки (Зинаида, Валентина и ???). Он всегда заботился о своих сестрах, а



Фото 1. Федор Иванович Рукавишников. 1940 г.
из группы истории геологии ГИН РАН

когда стал старше, обязательно помогал финансово.

В 1913 г. Федор окончил местную двухклассную школу в селе Тюбук и в 1914 г. поступил в сельскохозяйственную школу в расположенном рядом селе Булзи, которую окончил в 1915 г. После этого он поступил в Высшее начальное училище в Каслинском заводе, которое окончил в 1917 г. С осени 1917 до весны 1919 г. Федор обучался в 5–6 классах Каслинского реального училища. После этого он перебрался обратно в Тюбук, где до весны 1920 г. работал счетоводом в опытном хозяйстве и был секретарем комсомольской ячейки.

С 1 апреля 1920 г. Федор по командировке Екатеринбургской организации РКСМ (Российский коммунистический союз молодежи, или просто Комсомол) поступил на Рабочий факультет при Горном институте, который окончил 15 октября 1920 г. Интересно, что в феврале 1920 г. Федор вступил в ряды ВКП(б) (далее КПСС), но уже в октябре этого же года вышел из партии по собственному желанию во время проходившей тогда перерегистрации.

С 19 октября 1920 г. Горный институт вошел в большой Уральский государственный университет, и Федор продолжил свое обучение на геологоразведочном отделении Горного факультета. Здесь судьба свела его с известным минералогом, заведующим кафедрой К. К. Матвеевым [1], который стал его руководителем, а Федор, в свою очередь, на какое-то время стал «правой рукой» профессора (фото 2, 3). С 1923 по 1929 г. он работал исполняющим обязанности ассистента, а также вел практические занятия со студентами по курсу «Минералогия». С апреля 1924 по 1928 г. он работал препаратором при Минералогической лаборатории факультета. Глубокие геологические навыки Федор получил от знаменитого Ф. И. Кандыкина, который преподавал с самого основания учебного заведения и вел курс «Полезные ископаемые Урала» (фото 4). Попутно он постоянно занимался общественной работой института по линии профсоюза.

С лета 1923 г. Федор постоянно работал в различных партиях, сначала коллектором, а потом производителем работ и начальником партии. Вместе с К. К. Матвеевым он в качестве коллектора принимал участие в доизучении золоторудных объектов Южного Урала и в 1925 г. участвовал в открытии Гумбейского вольфрамового месторождения. В качестве геолога-производителя работ он отработал в Гумбейской вольфрамовой партии в течение лета 1928 г., в результате чего была представлена рукописная дипломная работа про Гумбейское месторождение вольфрама. Интересно, что в 1928 г. Федор работал под руководством инженера-геолога А. П. Смолина, личного врага К. К. Матвеева, и, по всей видимости, с тех пор Рукавиш-



Фото 2. Профессор К. К. Матвеев (слева) в своем рабочем кабинете в УрГУ. Рядом работает студент Ф. И. Рукавишников. Начало 1930-х гг. [2]



Фото 3. Ф. И. Рукавишников (справа) с Г. Н. Вертушковым (сидит слева), профессором К. К. Матвеевым (сидит справа) и коллегами. Начало 1930-х гг. из группы истории геологии ГИН РАН



Фото 4. Ф. И. Рукавишников (второй слева) с доцентом Ф. И. Кандыкиным (третий слева); остальные слева направо – С. П. Колодкин, И. В. Лепинский, Е. Д. Шлыгин, А. Н. Изумнов. 1925 г. Из Группы истории геологии ГИН РАН



Фото 5. Федор Иванович Рукавишников – горный инженер. 1929 г. Из Группы истории геологии ГИН РАН

ников перестал быть правой рукой профессора минералогии. В 1929 г. Федор стал начальником Антоновско-Липовской геологоразведочной партии, которая занималась изучением местных месторождений фосфоритов.

В июне 1929 г. Федор защитил квалификационную работу на тему «Гумбейские месторождения вольфрама на Южном Урале и проекты глубокой разведки одного из них» и стал горным инженером (фото 5). Защитился он уже в Уральском политехническом институте (УПИ), так как в 1925 г. постановлением Совета Народных Комисса-

ров РСФСР Уральский государственный университет был переименован. С 1 октября 1929 г. он стал аспирантом при Уральском научно-исследовательском институте, занимаясь фосфоритами и апатитами Антоновско-Липовского района и карналлитами Соликамского района.

Во время зарубежной командировки К. К. Матвеева в 1929–1930 гг. он полностью взял на себя преподавание минералогии. В мае 1930 г. Уральский политехнический институт по указу сверху разделяется на 10 институтов, и Горный институт снова выделяется в самостоятельную структуру. По всей видимости, в результате такого дробления в вузах возник дефицит преподавательских кадров, поэтому Федор Иванович сразу в 1930 г. стал исполняющим обязанности доцента и заместителем заведующего геологоразведочным отделением.

В начале 1931 г. Ф. И. Рукавишников, осознав свою прежнюю ошибку, снова решил вступить в ряды ВКП(б) и стал кандидатом в члены партии, а в 1937 г., уже будучи ректором, стал членом ВКП(б). С 24 ноября 1931 г. Федор Иванович становится заведующим специальностью «геология и разведка металлических ископаемых», а уже с 29 марта 1932 г. назначается заведующим Учебной частью и соответственно освобождает пост заведующего кафедрой. В декабре 1932 г. Ф. И. Рукавишников становится начальником учебно-производственного отдела и заведующим теоретическим обучением. В феврале 1933 г. Федор Иванович просит утверждения в звании доцента в связи с окончанием аспирантского стажа. В этом же году он публикует свою самую известную работу «Краткое руководство и таблицы для определения наиболее важных и распространенных уральских минералов» [4]. С сентября 1933 г. по июль 1934 г. является заместителем директора.

В 1931 г. Ф. И. Рукавишников работал начальником геологоразведочной партии по цветным камням и редким землям в Каслинском, Кыштымском и Уфалейском районах (кварц, аметист, демантоид, рутил и др.). В 1930–1934 гг.



Фото 6. Ф. И. Рукавишников и заведующий кафедрой М. Ф. Ортин (3-й справа) среди выпускников кафедры обогащения полезных ископаемых. 1936 г. Из Группы истории геологии ГИН РАН

Доля

Многие сюжеты остаются за кадром. Жизнь проявляется на пленке негатива в том случае, когда вокруг мало света, а если все озарить – в руках останется черная картинка.

Мало что известно о пропавших или изолированных людях. Возникает препятствие между человеком и историей: некому ее поведать. Происходит переплетение мыслей, вброс каких-то обрывистых слухов, которые не вяжутся между собой, образуя кучу непарных носков в углу. Начало чему-то есть, а конца – нет, или же имеем исход, однако не видим причины. Некоторые вещи уже бессмысленны, а смысл-то таится в вещах.

Полученная на руки булка хлеба аккуратно была положена на плоский камень.

– Наша. На десятерых, – дрожащим от волнения голосом произнес мужчина.

Из подходящей толпы послышалось:

– На девятерых.

– Найдем десятого!

Подобное не услышать и не увидеть обычному прохожему на улице города. Эти условия создаются ужасными обстоятельствами, когда в день (а то и реже) на пять пар человек выдается заветная булка хлеба и когда мир заканчивается колючей проволокой, стесняющей рамки возможности.

Летом в 1941 году двадцать тысяч советских военнопленных были заключены в концлагерь Берген-Бельзен, до этого (в мае предыдущего года) сюда поместили шесть сотен солдат из Бельгии и Франции, но только единицы из них встретили новых соседей по судьбе.

Молчаливый француз, находящийся в соседнем ограждении, ежедневно сидел на одном и том же месте и бросал свой взгляд то на одних, то на других пленных. В глазах его отражались события происходящего. Немногие подходили к нему, тем более беседовали. Страх может заставить отпрянуть от суровой правды, существующей в отражении истории одного человека.

Десятый кусок хлеба никто не рисковал брать. Тяжело сделать выбор в пользу одного человека, не евшего сегодня, когда таких рядом не меньше мошек на гниющем теле. В подобные моменты закрадываются мысли: «А не взять ли мне еще один кусочек?». Или раздаются в голове: «Это было на нашу группу. Поделитесь на девятерых!» К последнему можно добавить: «крошек будет больше».

Сколько не борись с совестью, но есть всем хочется.

Один из девятерых, подойдя к камню, взял это бремя на себя. Небольшой кусочек помещается на широкой, покрытой мозолями и царапинами ладони, которая, будучи внешне такой грубой, легкостью крыла не обронила ни одной крошки. Уже исхудавший за пару недель мужчина наклонился над изгородью, подозвав француза, склонившего голову к плечу.

– Позвольте, передам.

Стоявший человек по одну сторону с французом предложил свою помощь.

Мужчина с некоторым сомнением протянул кусок хлеба незнакомцу через небольшой лаз. Он может убежать и с чувством ликования, что обманул дурочка, съесть несчастный источник насыщения! Однако не та



Фото 7. Федор Иванович Рукавишников (слева) с уральскими геологами в Вишневых горах. 1939 г. [6]

эта личность, что пойдет на подобное, поэтому уже через минуту кривые, почерневшие, последние оставшиеся зубы вгрызались в животворящее золото. Не успевая быть проглоченным, кусочек расщеплялся еще во рту. С кошачьим урчанием голодный в два укуса поглотил его.

Мужчина, чьи руки были сравнены с крыльями, обратился к помогавшему:

- Товарищ, как тебя звать?
- Арсений Тимурович. А мне честь с кем говорить?
- Федор Иванович.
- Здравья тебе, Федя.

Думаю, что на этом моменте стоит сделать пояснение о герое этой истории. Рукавишников Федор Иванович, как и другие военнопленные, оказался запертым среди тернистой ограды металла, за которой проглядывалась опушка леса, на границе которой изо дня в день возникали новые холмы, не присыпанные землей.

– Здравья? – автоматически вырвалось из уст Рукавишникова.

На секунду дунул ветер усмешки.

– Чего вас это удивляет? Впрочем, может и хорошо. Не созерцать вам, как Раулю.

Федор Иванович покосился на француза, не желавшего отвлекаться от своих дел.

– Гаснет вера. Ох, гаснет... – пропел низким басом Арсений Тимурович.

– Чего бы ей жить?

Замысловатый вопрос был настолько щепетильным, что участники разговора сели друг перед другом. Торопиться некуда: время располагает.

– Пока у человека есть вера – ему присуща жизнь. Я ищу ее в молитвах. Где ведома она вам?

Столь затруднительный вопрос заставил брови Федора сформировать галочку, подобную птичьему клину.

– В воспоминаниях.

Ночью, когда предоставлен только свои мыслям, можно оторваться от действительности. Лежа под открытым небом, Федор Иванович небось вспоминал свое детство в кругу родных и близких, тогда его окружала семья, наполнявшая любовью и заботой его душу. Жар печи на щеках – яркое воспоминание в отцовской кузнице. Ведь он, Федя, когда возвращался домой на каникулы в свое родное село, не тратил время попусту и помогал по хозяйству. Будучи самым старшим в семье, чувствовал ответственность перед родными. Где-то далеко те милые вечера, когда сестры составляли ему компанию на кухне. Запах маминой еды. «Как там Нюночка, говорит ли?» – зацепились мысли о маленькой дочке; обрисованный в голове образ, как девочка сидит на коленях своей мамы, мелькал перед глазами.

Невольны выступили слезы.

Один день не отличался от другого. Холодно. Голодно. Иногда люди бросались друг на друга, чтобы отнять побольше хлеба – этот театр потешил надзирателей, из-за чего те даже не лезли разнимать. А на опушке леса все отчетливее становились «голые» холмы...

Как-то Федор Иванович полез разнимать двух пленных, которые, как яростные кабаны, готовы были разорвать хоть плоть. Эффект был ожидаемый. Другие тоже полезли разбираться, кто помочь, кто просто

Федор Иванович вместе с аспирантом, будущим известным минералогом Г. Н. Вертушковым, по заданию треста «Союзметразведка» проводил поиски титановых руд на Среднем Урале. Были выявлены рутиловые россыпи в верховьях речки Сухой Сугомак и установлено широкое распространение кварцевых жил, сложенных гранулированным кварцем. В 1934–1935 гг. Федор Иванович работал начальником и заместителем начальника Южно-Уральской хромитовой геологоразведочной партии в Челябинской, Актюбинской и Оренбургской областях.

В 1936 г. он становится первым помощником начальника учебной части (фото 6), а Горный институт ходатайствует перед Ломоносовским институтом Академии наук СССР о присуждении Федору Ивановичу ученой степени кандидата геолого-минералогических наук без защиты диссертации. В марте 1937 г. Президиум АН СССР присуждает Ф. И. Рукавишникову ученую степень кандидата геологических наук (без защиты диссертации) по совокупности работ по изучению геологического строения Урала. С апреля 1937 г. он становится начальником по учебной части, а с 15 мая этого же года – временно исполняющим обязанности директора. При этом надо понимать, что Федор Иванович всю работу в дирекции

института совмещал с работой доцента на кафедре минералогии, что давалось ему очень тяжело. Он еще в 1934 г. просил директора института освободить его от обязанностей по обеспечению учебного процесса студентов и предоставить больше времени для научных изысканий.

В конце сентября 1937 г. Федора Ивановича освободили от поста временно исполняющего обязанности директора и оставили ему только преподавание на кафедре минералогии. С чем это было связано, не совсем понятно, но в течение лета 1937 г. Ф. И. Рукавишников два раза ездил в Москву и, по всей видимости, договаривался об окончательном переводе туда (с 7 мая 1937 г. он по совместительству уже работал старшим научным сотрудником в ИГН АН СССР). Спустя месяц, 31 октября 1937 г., он был откомандирован в докторантуру Института геологических наук АН СССР.

По какой причине это произошло? Вполне вероятно, что к этому решению подтолкнули невыносимые условия на кафедре минералогии, которые создавал К. К. Матвеев для Ф. И. Рукавишникова. К сожалению, к 1937 г. Константин Константинович стал воспринимать своего бывшего ученика как конкурента, и если смотреть со стороны, то Федор Иванович в сравнении с пожилым профессором



жаждал расплаты. Из кучной потасовки прилетела тяжелая рука прямо в голову Рукавишникова, он тут же попятился назад и приземлился в стороне от суматохи. Отходя от звездного удара, Федор Иванович не смог даже опомниться, как разогнали толпу. Но он был готов подтвердить, что слышал пару выстрелов.

– Сильно приложили? – голос послышался где-то со стороны левого уха.

– Недурно, но не уложили.

Оказалось, что потерпевший очутился рядом с колючим забором, по ту сторону которого на корточках сидел Арсений, зажав зубами соломину.

– Льда не предложу, но это холодное.

Арсений через ямку под забором протянул камень. Естественно, не лед, но будто бы стало легче голове. При одном взгляде на камень Рукавишников признал в нем полевой шпат; печально и любовно он глубоко вздохнул.

Сложившаяся ситуация дала ему вспомнить годы, когда он работал вместе со своим наставником профессором Константином Константиновичем Матвеевым, в жизненном пути с которым в дальнейшем сложились не теплые отношения. Положила начало вражда между Матвеевым и Смолиным. На взгляд своего бывшего покровителя, Федор поступил, как Иуда, начавший работать с его конкурентом.

Теперь Федор Иванович видел во вражде столько бессмыслия, что она выстроена на глупом достигаторстве, простой ревности, (и может) на человеческой ущербности. (Возможно, что это причина многих войн?) Матвеев не был рад, получив в один год со своим учеником звание кандидата геологических наук. Ведь он почти в два раза старше Рукавишникова... Унизительно? Ничтожно. Ничтожны все достижения при полном погружении в военные действия. Именно сейчас сила вещей утрачивается, дух закаляется, сердце истошно бьется. В глазах Федора загорелся огонь.

В щели загорода между колючей проволокой не виден взор француза, и кажется, что среди деревьев холмы стали еще выше... Такovy плоды человеческие. Невежество не пара человеческому уму, а гнев и ненависть не пара человеческому сердцу.

Каждую весну, когда солнце становится дружелюбней, но грязи еще немного после оттаявшего снега, Арсений Тимурович приходил к мемориалу, посвященному погибшим в годы войны. Именно здесь захоронены пленные Берген-Бельзена, именно здесь погиб Федя весной сорок второго года. Во время пребывания в концлагере они вдвоем делили участь, долю заключения. День омрачения подкрался, как пестрая кошка, забрав одним утром жизнь Рукавишникова.

Пожилый мужчина навис над могилой. Его печальный взгляд смотрел куда-то глубоко в каменную плиту, будто она казалась ему прозрачной. Арсений достал из сумки два алюминиевых стаканчика, поставил перед могилой, разлил в каждую водочку на одну треть объема. Поверх одной кружки он положил десятую долю буханки хлеба. Для него, Арсения, это был традиционный обряд. Если бы тогда не беседы с Федором, не разделенные мысли, то он так бы и остался по ту сторону колючей преграды, сгинул во мраке.

Посидев еще немного, Арсений Тимурович опустошил свою кружку и направился по тропинке, зная, что больше не увидит между деревьями человеческих тел.



**Фото 8. Ф. И. Рукавишников с женой и сыном. Примерно 1935 г.
Из архива Музея истории УГГУ**

выглядел более выигранно. Они оба были кандидатами наук (причем получили эту степень одновременно в 1937 г. и без защиты, при этом К. К. Матвеев просил для себя степень доктора наук, но ему дали только степень кандидата наук), один – бессменный заведующий кафедрой, а другой вращался в дирекции института, занимая должности проректора и ректора. Ну и, конечно, возраст. Одному было 62 года, а другому – 35 лет. Константин Константинович, «царствуя» на кафедре, постоянно писал агрессивные записки в ректорат, жалуясь на «несносного» доцента Ф. И. Рукавишникова. Он боялся потерять любимую кафедру и всячески пытался выжить своего бывшего ученика. Ну а Федор Иванович, видимо, не видел перспектив для работы в такой обстановке и своего развития в научном плане.

Жена Федора Ивановича в 1937 г. с отличием окончила Свердловский горный институт и уже с 1 июня 1937 г., по всей видимости, по распределению стала работать младшим научным сотрудником Института геологических наук АН СССР. Ну, а Ф. И. Рукавишников (на тот момент ректор и соответственно глава комиссии по распределению) помог жене и сыну перебраться в столицу.

В любом случае в конце 1937 г. Федор Иванович вошел в штат Института геологических наук АН СССР и стал активно работать по южноуральским и казахстанским объектам. В 1938–1940 гг. он ездил на полевые работы (фото 7) и единолично опубликовал две работы об Айдырлинских золотовольфрамовых месторождениях на Южном Урале, а в 1941 г. совместно с женой выпустил книжку об Притобольских гранитных массивах и их металлогении. С 15 апреля 1939 г. он заместителем директора Геологического музея и заведующим Гониометрическим кабинетом. С 1 февраля 1940 г. Федор Иванович стал помощником председателя Экономсовета при Совнарком (Совете Народных Комиссаров) СССР, а с 5 июня 1940 г. – инженером Хозяйственного совета по металлургии и химии.

Начало Великой Отечественной войны застало Федора Ивановича в Москве, и уже 7 июля он записался в московское народное ополчение, которое ранней осенью сдерживало полчища гитлеровских войск на подступах к

столице. По всей видимости, его взяли в плен под Вязьмой, так как в концлагере Берген-Бельзен (или шталаг XI С (311) близ г. Бергена в Нижней Саксонии), в который он попал, ему присвоили номер 18960. При этом точно известно, что 8 и 10 ноября 1941 г. в Берген-Бельзен прислали последнюю партию – 1000 военнопленных из взятых в плен под Вязьмой и Ельней, и крайний зарегистрированный номер военнопленного на тот момент был 21109. Из этого следует, что Ф. И. Рукавишников прибыл в концлагерь примерно в середине-конце октября. Жизнь военнопленных была трудна, они жили под открытым небом, и только с наступлением зимы им позволили строить шалашики. Нормой еды была одна булка хлеба в день на 10 человек, но даже такую мизерную пайку пленные не всегда получали. Удивительно, что Федор Иванович в таких нечеловеческих условиях продержался до весны, он умер 21 марта 1942 г. [5]. При этом, согласно официальной информации, Ф. И. Рукавишников без вести пропал/погиб осенью 1941 г. Кстати, сестра Рукавишникова, Зинаида Ивановна, после войны утверждала, что ее брат попал в 1941 г. в окружение и далее руководил партизанским отрядом, который воевал в брянских лесах, и погиб Федор Иванович в 1942 г. (это она якобы услышала по радио) [2]. Понятное дело, это были домыслы бедной женщины, потерявшей родного брата.

Федор Иванович прожил короткую, но яркую жизнь. За свои 40 лет он успел многое. Женился (Ия Александровна Рукавишникова, 1905–1960, см. фото 8), воспитывал сына (Владимир, 1925–1986, который успел повоевать и отомстить фашистам за отца, был ранен в 1944 г., стал художником) и дочь (Нина, 1940 г. р., работала диктором на радио). Стоял у истоков создания нового Свердловского горного института в момент развала гигантского Уральского университета, сделал карьеру от ассистента до ректора учреждения. Вместе со своим учителем К. К. Матвеевым стал первооткрывателем Гумбейского шеелитового месторождения. Создал первый уральский определитель минералов по внешним признакам и подготовил сотни дипломированных геологов и минералогов. Уехав в московскую докторантуру, он активно изучал

гранитоиды Южного Урала, и все шло к успешной защите докторской диссертации. Он погиб, защищая Родину, за что глубокий поклон ему от всех ныне живущих россиян, в том числе и от авторов.

В честь Федора Ивановича в 1993 г. известный ученый-минералог Б. В. Чесноков назвал новый минерал рукавишниковитом [7, 8]. Интересно, что доклад о находке нового минерала был сделан еще в 1991 г. на заседании Ильменского отделения ВМО, а вот печатная версия задержалась на целых два года. Борис Валентинович образцы с рукавишниковитом, отобранные в 1985 г., обнаружил в горелых породах террикона шахты № 45 в г. Копейске. Рукавишниковит образует пропластки в кусках обожженного окаменелого дерева, согласные годовой слоистости бывшей древесины. Пропластки достигают нескольких сантиметров в длину и 3–4 мм в толщину. Строение пропластков зональное: центральные их части сложены мелкозернистым рукавишниковитом (фото 9), а наружные – мелкозернистым белым или розоватым ангидритом. На стенках мелких полостей в пропластках наблюдались тонкие бесцветные иглы флюорэллестадиита.

Агрегаты рукавишниковита белые, с легким голубовато-зеленым оттенком. Зерна его просвечивающие или полупрозрачные, блеск – стеклянный, черта – белая. Твердость около 4,5; хрупкий. Более или менее четкой спайности не обнаружено. Определение плотности не сделано из-за тонких включений других минералов. Перед паяльной трубкой рукавишниковит сильно светится белым цветом, немного вспухает, но не плавится. После прокаливания белый. В закрытой трубке налетов не выделяет. В соляной кислоте разлагается с образованием хлопьевидно-студенистого кремнезема. Реакция на сульфат-ион с BaCl_2 положительная (выпадает золотистый осадок барита).

В иммерсии под микроскопом бесцветный, двупреломление низкое. Двуосный, отрицательный; $N_g = 1,639$, $N_m = 1,638$, $N_p = 1,634$, $N_g - N_p = 0,005$. В центральных ча-

стях зерен рукавишниковита встречаются ядра ларнита, за счет которого, по-видимому, и развивался открытый минерал. Почти всегда между рукавишниковитом и ларнитом находится кайма какого-то недиагностированного минерала. Химический состав рукавишниковита, полученный микросондовым анализом, следующий (среднее из 8 анализов, мас. %): $\text{SiO}_2 - 24,88$; $\text{SO}_3 - 16,13$; $\text{CaO} - 58,99$; $\text{Cl} - 0,07$; сумма – 100,07. Данные анализа пересчитываются на следующую эмпирическую формулу – $\text{Ca}_{5,00}[\text{SiO}_4]_{1,97}[(\text{SO}_4)_{0,96}\text{Cl}_{0,04}]_{1,00}$ или идеализированную формулу – $\text{Ca}_5[\text{SiO}_4]_2(-\text{SO}_4)$, так называемый «сульфатный спуррит» технологов.

Дифрактограмма рукавишниковита аналогична порошковой синтетического ромбического соединения $\text{Ca}_5[\text{SiO}_4]_2(\text{SO}_4)$. Минерал ромбический; $a = 10,16(1)$; $b = 15,38(1)$; $c = 6,80(1)$ Å; $V = 1062,57$ Å³. Плотность вычислена 2,972 г/см³.



Фото 9. Мелкозернистый агрегат рукавишниковита (размер образца 3 × 5 мм) из собрания Уральского геологического музея. Фото И. С. Костылева, студента 4 курса УГГУ



Фото 10. Скопления голубого тернесита в породе. Эйфель, Германия. С сайта e-rock.com

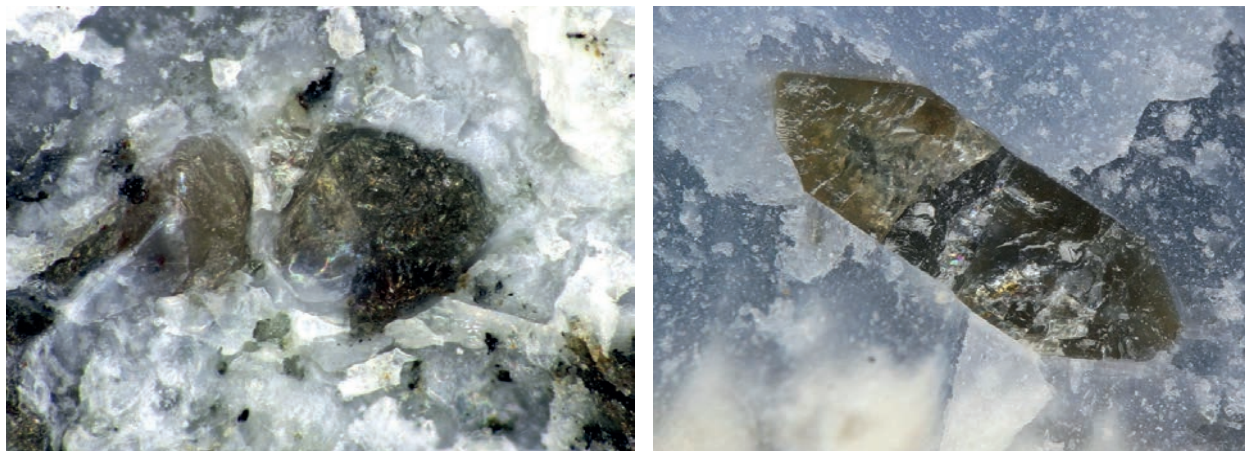


Фото 11. Кристаллы коричневого тернесита в метакарбонатной матрице. Эйфель, Германия. С сайта e-rock.com

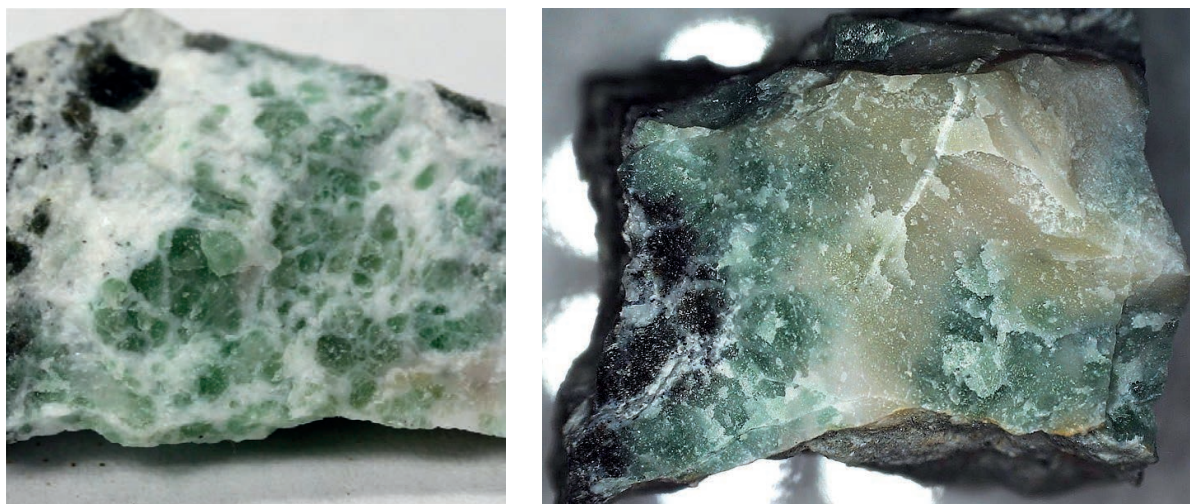


Фото 12. Зеленый тернесит в метакарбонатной матрице. Эйфель, Германия. С сайта mindat.org

Рукавишниковит, по-видимому, является продуктом изменения (сульфатизации) ларнита, возникшего за счет кварцевых жилок в окаменелом дереве. Указанное синтетическое соединение получается при температуре 1100 °С. В обжигаемом материале и в футеровке портландцементных и известковых печей «сульфатный спуррит» образуется также при высокой температуре (около 1200 °С). Нахождение рукавишниковита в природе вероятно среди высокотемпературных продуктов изменения известняковых (мергелевых и др.) ксенолитов в вулканических породах [7, 8], что, собственно говоря, вскоре и подтвердилось.

Рукавишниковит является веществом антропогенного (техногенного) происхождения (горящий угольный отвал). Нынешние правила Международной минералогической ассоциации (ММА) не допускают, чтобы такие вещества были утверждены в качестве действительных минеральных видов. После того, как целый ряд минералов, открытых Б. В. Чесноковым, не стали даже рассматривать (по словам В. И. Кудряшовой [9]: «шесть минералов не рассматривались КНМ ВМО и ММА: овчинниковит, игниколотит, торбаковаит, подногинит, кутюхинит и перковаит»), Борис Валентинович перестал подавать новые минералы из горящих угольных отвалов на рассмотрение.

К сожалению, в этот список неудачливых минералов попал и рукавишниковит.

Примерно через 5 лет после открытия рукавишниковита очень близкий к нему минерал был обнаружен в природе и в 1995 г. утвержден ММА как новый минерал под названием тернесит с идеализированной формулой $\text{Ca}_5[\text{SiO}_4]_2(\text{SO}_4)$ [10].

Тернесит был назван в честь Бернда Тернеса из Майена (Германия), который нашел данный минерал и предоставил образцы для изучения. Тернесит был обнаружен в метакарбонатных ксенолитах среди щелочных базальтов (лейцитовых тефритов) близ Майена (Эйфель, Германия). Он образует зернистые агрегаты и призматические кристаллы размером до 0,2 мм по удлинению. Окрашен в голубоватый, коричневатый и зеленоватый цвета. Двухосный, отрицательный; $\text{Ng} = 1,640$, $\text{Nm} = 1,637$, $\text{Np} = 1,630$, $\text{Ng-Np} = 0,010$. Плотность измеренная 2,94 г/см³, вычисленная 2,97 г/см³. Твердость 4,5–5. Химический состав тернесита следующий, мас. %: SiO_2 – 25,22; SO_3 – 16,34; CaO – 58,90; сумма – 100,46. Он является ромбическим с пространственной формой *Pnma*, параметры элементарной ячейки: $a = 6,863(1)$; $b = 15,387(2)$; $c = 10,181(2)$ Å, $V = 1075,12$ Å³. Температура образования тернесита оце-

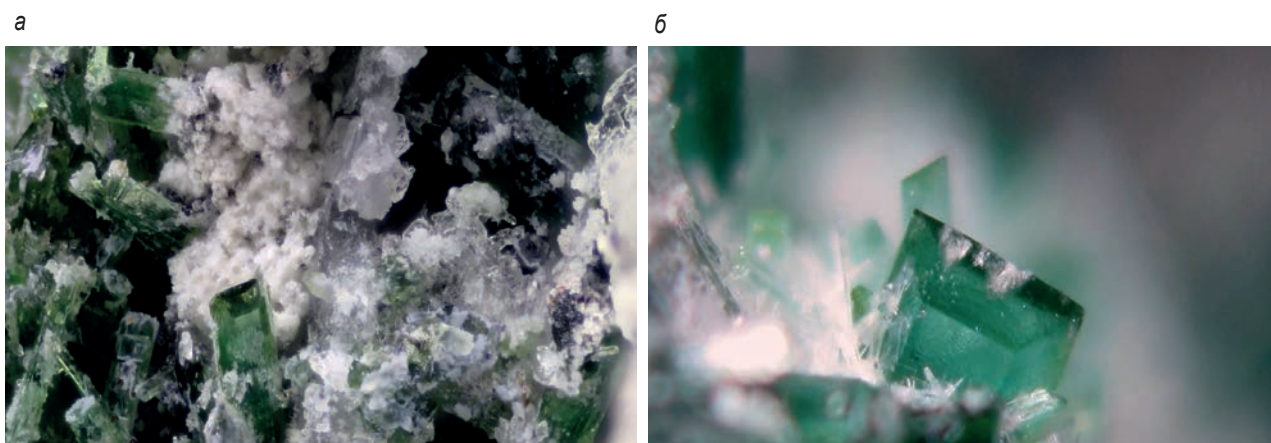


Фото 13. Кристаллы зеленого тернесита в шлаке. Лапануз, Окситания, Франция: а – внешний вид образца; б – увеличенный фрагмент. С сайта mindat.org



Фото 14. Кристаллы голубовато-зеленого тернесита в шлаке. Лапануз, Окситания, Франция. С сайта e-rock.com

нивается в пределах 1000–1300 °С. Как видно из описания, тернесит является полной копией рукавишниковита. К сожалению, из-за неочевидной и немного странной позиции ММА название рукавишниковита постепенно стирается из мировой минералогии, хотя он был открыт раньше, чем тернесит.

В целом тернесит является крайне редким минералом, который пока обнаружен в пирометаморфических комплексах Израиля и Палестины, а также в Германии (фото 10–12) и России. Кроме того, он установлен в металлургических шлаках во Франции (фото 13, 14). Тернесит ценится у коллекционеров, в первую очередь как редкий минерал.

Авторы благодарны канд. геол.-минерал. наук Ю. В. Ерохину (ИГГ УрО РАН) за активную помощь в подготовке данной статьи, канд. геогр. наук И. П. Второву (руководителю группы истории геологии ГИН РАН) за фотографии Ф. И. Рукавишников, а также директору Уральского геологического музея канд. геол.-минерал. наук Д. А. Клейменову и студенту Илье Костылеву за фотографию рукавишниковита.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шорин А. Г., Ерохин Ю. В. Константин Константинович Матвеев (1875–1954) и бывший матвеевит (ныне бенякарит) // Известия УГГУ. 2022. Вып. 1 (65). С. 179–189.
2. Емлин Э. Ф. Очерки истории кафедры минералогии Уральского горного института. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2008. 257 с.
3. Филатов В. В. «Отечества пользы для...» (75 лет Уральскому горному институту). Екатеринбург: УГИ, 1992. 408 с.
4. Рукавишников Ф. И. Краткое руководство и таблицы для определения наиболее важных и распространенных уральских минералов. Свердловск: Горный институт, 1933. 90 с.
5. Центральный архив министерства обороны. Фонд 58. Опись 977526. Единица хранения 186.
6. Войтеховский Ю. Л. Несколько фото из архива профессора Д. П. Григорьева // Двадцать третьи Всероссийские научные чтения памяти ильменского минералога В. О. Полякова. Миасс: ИМин ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН, 2022. С. 130–140.

7. Чесноков Б. В., Вилисов В. А., Баженова Л. Ф., Бушмакин А. Ф., Котляров В. А. Новые минералы из горелых отвалов Челябинского угольного бассейна (сообщение пятое) // Уральский минералогический сборник. 1993. № 2. С. 3–36.
8. Чесноков Б. В., Щербакова Е. П., Нишанбаев Т. П. Минералы горелых отвалов Челябинского угольного бассейна. Миасс: ИМин УрО РАН, 2008. 139 с.
9. Кудряшова В. И. Новые минералы. XLIX // Записки ВМО. 1995. № 6. С. 108–120.
10. Irran E., Tillmanns E., Hentschel G. Ternesite, $\text{Ca}_3[\text{SiO}_4]_2(\text{SO}_4)$, a new mineral from the Ettringer Bellerberg, Eifel/Germany // Mineralogy and Petrology. 1997. Vol. 60. P. 121–132. <https://doi.org/10.1007/BF01163138>

Статья поступила в редакцию 17 ноября 2023 года

Иван Герман – подданный двух империй

Ivan Herman – citizen of two empires

Владимир Викторович ФИЛАТОВ*

VLADIMIR VIKTOROVICH FILATOV*

Владимирский государственный университет
им. А. Г. и Н. Г. Столетовых, Владимир, РоссияVladimir State University named after Alexander and Nikolay
Stoletovs, Vladimir, Russia

*filatov47@bk.ru

*filatov47@bk.ru

Аннотация

Создание, становление и развитие горного дела и горной науки в России в значительной мере обязано деятельности многих иностранных специалистов, в частности, уроженцу Австрии И. Ф. Герману (1755–1815), который приехал в Россию в 1782 г. Научно-практическая деятельность Германа была многогранной: по его проекту на Урале была построена первая в стране сталелитейная фабрика; для изучения геологии и горно-заводского дела он совершил пять путешествий по Уралу и Сибири; в 1802–1812 гг. он возглавлял горную администрацию Урала; в 1803 г. им была создана в Екатеринбурге первая на Урале типография; он был членом Берг-коллегии, имея чин обер-берг-гауптмана IV класса; в 1790 г. его избрали ординарным академиком Санкт-Петербургской академии наук; им опубликовано около 60 работ по различным вопросам горного дела, геологии, минералогии и статистики; его имя было широко известно в различных европейских академиях и научных обществах.

Ключевые слова: Австрия, Бенедикт Франц Иоганн Герман, Россия, Урал, Сибирь, академик Иван Филиппович Герман.

Abstract

The creation, formation and development of mining and mining science in Russia is largely due to the activities of many foreign specialists, in particular, the native of Austria I. F. Herman (1755–1815), who came to Russia in 1782. Scientific and practical activities of Herman was multifaceted: according to his project, the country's first steel factory was built in the Urals; to study geology and mining, he made five trips to the Urals and Siberia; in 1802–1812 he was the head of the mining administration of the Urals; in 1803 he created the first printing house in the Urals in Yekaterinburg; he was a member of the Berg College, holding the rank of Oberberg-Hauptmann class IV; in 1790 he was elected ordinary academician of the St. Petersburg Academy of Sciences; he published about 60 works on various issues of mining, geology, mineralogy and statistics; his name was widely known in various European academies and scientific societies.

Keywords: Austria, Benedict Franz Johann von Hermann, Russia, Ural, Siberia, academician Ivan Filippovich Herman.

Поездка в Мурау

«Нам не дано предугадать, как слово наше отзовется». В справедливости этой сентенции Федора Ивановича Тютчева я убедился не единожды, в частности, в 1995 г. В январе этого года в Екатеринбург приехал преподаватель университета в г. Граце доктор Хервиг Вампрехтсамер. Он интересовался своим выдающимся соотечественником Бенедиктом Францем Иоганном Германом, которого в России называли Иван Филиппович. Ректор института И. В. Дементьев попросил меня встретиться с гостем. Поскольку доктор Вампрехтсамер совсем не знал русского языка, а я знал немецкий только со словарем, то мы разговаривали через переводчика, коим была моя институтская преподавательница Маргарита Сергеевна Молокова. Я рассказал доктору Вампрехтсамеру все, что знал о Германе, об истории горного дела на Урале, устроил экскурсию по исторической части города, благо, что погода благоприятствовала нам – было ясно и солнечно, держался легкий морозец; Вампрехтсамер познакомился в областном архиве с формуляром (личным делом) Германа и на основании всего увиденного, услышанного и прочитанного написал небольшой и суховатый очерк, сопроводив его текстом формуляра, и опубликовал в Уральском горном обозрении [1, 2]. Гость вскоре уехал, и я о нем забыл.

Нежданно и негаданно 14 января 2010 г. я получил из Австрии письмо, в котором было приглашение от члена горно-исторического общества (Montanhistorischer Verein Osterreich) профессора Леобенского горного университета (Montanuniversitet Leoben) Ганса Колба приехать в



Фото 1. Бенедикт Франц Иоганн Герман

середине сентября в Мурау на конференцию, посвященную 255-летию со дня рождения Б. Ф. И. Германа. Дата не юбилейная. Но австрийцам виднее, когда проводить мероприятие в честь своего выдающегося соотечественника. В письме также сообщалось, что поездка и услуги переводчика мне будут оплачены горной компанией ОМИА, которая сотрудничает с горным предприятием в г. Полевском. Я ответил профессору Колбу, что готов приехать на конференцию. Вскоре у меня состоялась встреча с руководителем полевого предприятия М. Н. Поповым



Фото 2. Иван Филиппович Герман



Фото 3. Памятная доска – Замок Мурау

и с сотрудником компании ОМИА Вольфгангом Штуденером, который оформил мне визу и передал монографию о Б. Ф. И. Германе «Авантюрная жизнь Бенедикта Германа», автором которой является Гельмут Флюгель, профессор университета в Граце, а я в свою очередь Вольфгангу подарил образец калийной соли Верхнекамского месторождения.

Летом я готовился к поездке в Австрию: сфотографировал в фонде редкой книги в областном краеведческом музее обложки книг И. Ф. Германа, изданных им в Екатеринбурге, с помощью директора Уральского геологического музея Д. А. Клейменова подготовил коллекцию образцов амазонита, вольфрамиты и флюорита, месторождения которых в Ильменах и в Боёвке около 1783 г. посетил и описал И. Ф. Герман, сфотографировал екатеринбургские здания, в которых он бывал, подобрал в подарок свои монографии и составил текст доклада. Все как будто бы предусмотрел. Можно ехать.

14 сентября я рано утром вылетел из Кольцово в Шереметьево, где случилась единственная за всю поездку неприятность: при таможенном досмотре багажа у меня отобрали коробку с минералами, сказав, что это национальное достояние и вывозить образцы за пределы страны без специального разрешения нельзя. Досадно. Но помня, что кошка скребет на свой хребет, а сила солому ломит, я не стал спорить с таможенниками. Нельзя так нельзя.

Также рано утром, только по венскому времени, ведь самолет летел навстречу дню, я прилетел в Вену. Аэропорт показался мне огромным, беспокойно-суетным, неуютным, на стенах развешены гигантские, яркие постеры картин Густава Климта. На привокзальной площади меня встретил, держа высоко лист бумаги с моей фамилией, Вольфганг Штуденер. Молодец! Тут же он позвонил в Полевской М. Н. Попову и сообщил, что я прилетел. Через 2 часа Вольфганг улетел в Москву. Пока мы ждали машину, на которой меня повезут в Мурау, выпили по чашке кофе

и посудачили. Вольфганг неплохо говорил по-русски. Пришла машина. Мы распрощались, и я поехал. До Мурау почти 200 километров. Хотя от аэропорта до Вены всего 16 км, но в столицу мы не заехали.

День солнечный, +20°, тихо, листва на деревьях еще не тронута позолотой, как на Урале, неоглядные зеленые дали, синие Альпы на горизонте, голубовато-серая лента шоссе. Скорость. Разделительный барьер. Никаких остановок. Водитель Харольд – сотрудник ОМИА, полтора года работал в России, но по-русски говорит неважно, женат на русской из Башкирии; женой доволен. Почему он женился не на соотечественнице, спросил я Харольда? Он ответил, что у австрийских женщин теперь на первом месте не Kirche, Kuche und Kinder, а заняты они только своей карьерой, зарабатыванием денег и больше ничто их не интересует. Заехали в Леобен, проехали мимо Горного университета, над входом в главный корпус которого золотится надпись «Glückauf» – старинное пожелание удачи немецких горняков перед спуском в шахту. К вечеру приехали в Мурау. Остановились возле двухэтажного, вытянутого вдоль улицы у подножия холма, четырехзвездного отеля-гастхофа Lercher. Здесь мне забронирован номер. Из огромного панорамного окна в номере открывается замечательный вид на уютный, садово-дачный двухтысячный Мурау на фоне Альп, на миниатюрных участках копошатся аккуратно одетые фрау.

Разложив вещи и отдохнув, я взял фотоаппарат и пошагал знакомиться с Мурау – картиночно-игрушечным, чистым и почти безлюдным городком, расположенным в узкой долине Мурау у слияния его с Рантенбахом. Перешел по мосту Мур, кипящий холодной зеленовато-голубой водой, на правый берег. Сфотографировал бронзовую фигуру королевы реки Мурну, сидящую на камне у уреза воды.

На левом берегу высилась зеленая доминанта – замковая гора Шлоссберг с четырехэтажным параллелепипедом

белого цвета на вершине – замком Обермурау. Замок был построен на средства местной знаменитости, рыцаря-меченостреля, автора кургуазного романа «Служение дамам» Ульриха фон Лихтенштейна (1200–1275) в 1232 г. Ульрих был тот еще дамский угодник, мог, например, в угоду даме выпить грязной воды или сделать какую-нибудь иную глупость. В 1617 г. одна из потомков Лихтенштейна Анна Нойман, дама очень любвеобильная, но бездетная, умная и рачительная, похоронив всех родственников, вышла замуж за 31-летнего графа Г. Л. фон Шварценберга; в 1623 г. она умерла в возрасте 88 лет, и все ее богатства достались графу. С тех пор замком владеет аристократический род Шварценбергов; представители рода считают себя не австрийцами, а чехами и потому живут в Чехии. Замок не раз бывал разрушен, но его быстро восстанавливали. Не захирел и род Шварценбергов. Когда в 1960 г. в Австрию на встречу с Н. С. Хрущевым приезжал Дж. Кеннеди, то его жена Жаклин первый визит сделала Шварценбергам. Замок закрыт для свободного посещения; только два раза в неделю служители принимают организованные экскурсии, показывая всего семь залов, в том числе Рыцарский, тюрьму и часовню. Отношения владельцев замка и местного населения недоброжелательные. Через день в замке в виде исключения должна была проходить конференция. Почему в замке? Потому что в замке была четырехклассная школа, в которой учился И. Ф. Герман.

Ниже по склону замковой горы стоит белая, с краснокирпичными контрфорсами, остроконечная одностропная приходская церковь Святого Матфея, построенная в 1284 г., к стенам которой прислонены большие прямоугольные плиты из светло-серого известняка с изображениями святых и рыцарей. По другому мосту я перешел опять на левый берег. Погулял по узким средневековым улочкам. Зашел в кафе, выпил хороший кофе. Поднялся в отель, принял душ, блаженно растянулся на широкой кровати и сразу уснул.

Утро солнечное, тихое – почти как в раю, о котором Леонид Леонов написал в «Пирамиде», что в раю всегда полдень и отличная погода. Хороший шведский завтрак. По дорожке, охватывающей гору Шлосберг полувитком спирали, я поднялся к замку; во двор вход свободный; полюбовался великолепными часами на одной из стен и красивой в архитектурном отношении барочной часовней; по длинной деревянной галерее спустился мимо приходской церкви к набережной и, перейдя пути узкоко-

лейки, углубился в ухоженный лесопарк. Свежо. Посидел на берегу озерца: плавают утки, плещется крупная рыба. Посмотрел, как местные школьники под руководством двух учительниц занимаются физкультурой, бегая вокруг озера, и определяют высоту деревьев, используя свойства подобных треугольников. Спросил у местного жителя, как пройти к замку Грюнфельс. Он поинтересовался, кто я. Ответил: "Ich bin doctor geolog-mineralisch Wissenschaft und professor Montanuniversitet Ural" и добавил, что приехал в Мурау на конференцию, посвященную юбилею Herforragend Gelehrt Osterreich Hermann. Мой собеседник не слышал ни о конференции, ни о Германе. Но для меня главным было то, что я смог добраться до замка, со стены которого было хорошо видно Мурау. Нагулявшись, я зашел в центре Мурау на площади Шиллера, украшенной Марианской колонной с шестью фигурами святых, в ресторан, пообедал и выпил отличного местного пива Murauer Bier, которое варят здесь с начала XV в.

Отобедав, я обошел все углы и закоулки Мурау и, напитавшись его стариной и современностью, вернулся в отель. Ближе к вечеру небо стало затягиваться тучами; около шести часов раздался телефонный звонок. Позво-



Фото 4. Замок Мурау



Фото 5. Замок Мурау и приходская церковь



Фото 6. Владимир Филатов и Гельмут Флюгель



Фото 7. Герхард Сперль и Владимир Филатов

нил профессор Колб. Я спустился на ресепшен и познакомился с австрийскими коллегами, сказав им, что говорю по-немецки только со словарем. Пережили это сообщение и они, и тем более я. Колб сообщил, что завтра утром придет моя переводчица. Жалко, что не сегодня.

Профессор Колб был высок, шкиперская борода, крупнотел, но подвижен, говорил сочным баритоном, сед, вероятно, старше меня. Пригласил меня и двух своих леobenских коллег-супругов поужинать. Во время ужина я

рассказал о том, где был в Мурау, что видел, поведал, как мог, об Уральском горном университете и показал привезенные мной книги. Сотрапезники с интересом их полистали и спросили, а почему они не на немецком языке. Чудаки! Потому что изданы в России – ответил я.

Во время ужина профессор Колб позвонил переводчице и передал трубку мне. Переводчицу звали Лена, русская, голос мелодичный. А какова сама – увижу завтра. Обсудили с ней содержание моего доклада. Волнуется,



Фото 8. В. Филатов, Э. Кирхнер, Г. Колб



Фото 9. Ганс Колб и Владимир Филатов на кафедре Г. Колба

сможет ли сделать хороший перевод. Обещал ей написать текст доклада.

Поздно вечером меня пригласили на общее застолье. Съехались почти все участники конференции. Сидели за большим столом, разговаривали и пили очень вкусное местное вино. Беседа была очень оживленной, веселой, все были раскрепощены, держали себя дружески и свободно. По правую руку от меня сидел профессор Колб, а по левую ехидный сосед, который все подначивал меня: «Вы вино предпочитаете, конечно, русскую водку?». Я ответил: «Nein! Ich liebe deutsche Schnapsee». Около 10 часов я сказал всем: «Gute Nacht» и пошел спать. Долго не мог заснуть.

Утро конференции. Пасмурно, ночью прошел дождь, горы закрыты облаками, сыро, тихо. Около 8 часов спустился в ресторан. Мои вчерашние знакомые были уже там: доброжелательно здоровались со мной, желая доброго утра. Позавтракал, погулял перед гостиницей. Две барышни укладывали в автомобиль какие-то коробки; я попросил их отвезти в замок большой пакет со своими книгами. Приехала моя переводчица, и я почувствовал себя увереннее – симпатичная, черноволосая, родом из Днепропетровска, окончила Горный институт, экономист, познакомилась 2 года назад с австрийским бизнесменом, вышла за него замуж и переехала в Австрию, понемногу



Фото 10. Владимир Филатов у входа в Леобенский университет



Фото 11. Памятник Петеру фон Туннеру

привыкая к менталитету мужа. Передал ее текст доклада. На автомобиле с Леной и профессором Колбом поднялись в замок. Теперь я был окончательно спокоен: у меня два ангела-хранителя – Лена и Колб.

По широкой лестнице взойшли на третий этаж. По длинному коридору, одна стена которого увешана старинными ружьями и отпрепарированными головами убитых зверей, прошли к залу заседания. Приятная неожиданность: один из участников конференции мне хорошо знаком. Это Гюнтер Кноль. В 1993 г. он с коллегой приезжал в Екатеринбург, и я для них провел экскурсию по городу, рассказывал и об И. Ф. Германе, о котором они, как ни странно, ничего не знали.

Доктор Колб познакомил меня с президентом Горно-исторического общества профессором Герхардом Сперлем. Оба одеты в изящную форму черного цвета с позолоченными пуговицами. Профессор Сперль среднего роста, сух, подтянут, щеточка усов, короткая стрижка, живой взгляд – вид типичного австрийского офицера времен Первой мировой войны.

Заседание проходило в просторной зале с высокими окнами, выходящими на правый берег Мура и на замок Грюнфельс. Собралось 38 человек, в основном мужчины: все преклонного возраста – палочки, шаркающая походка, одеты скромно, по-домашнему. Ко мне подошел еще один знакомый, профессор Карл Стадлобер, член Общества профессоров горного дела (SOMP), который был участником X сессии SOMP, проходившей в июле 1999 г. в Екате-

ринбурге в Уральской государственной горно-геологической академии (УГГА). Президентом сессии был ректор УГГА И. В. Дементьев. Профессор Стадлобер попросил меня передать привет Ивану Васильевичу. Я его огорчил, сказав, что Иван Васильевич умер в марте прошлого года. Вспоминали сессию SOMP, ее мероприятия, экскурсии, которые я провел для участников сессии.

Конференцию открыл приветственным словом профессор Сперль, представив собравшимся докладчиков и меня. Я встал. Мне поаплодировали. Потом всех поприветствовал бургомистр городской общины Мурау и представитель земли Штейермарк Томас Калхер. Так завершилась официальная часть конференции. Далее ее вел профессор Колб.

Программа конференции была скудной, скупой и узкотематической, не соответствовавшей ни научно-практической значимости И. Ф. Германа в истории горного дела и горной науки, ни почтенности юбилейной даты: было представлено пять получасовых докладов. Первый доклад «Об исследованиях Бенедикта Германа» сделал профессор Флюгель; автором второго – «Чугун Евгения Инзаги» – был профессор Сперль, который рассказал о чугунолитейном заводе Евгения Инзаги, находившемся в бенедиктинском аббатстве Святого Ламбрехта в середине XVIII в. (во время Второй мировой войны в монастыре был филиал концлагеря Маутхаузен); третий доклад «О взглядах Б. Германа на черную металлургию» прочитал профессор Кёстлер; четвертый – «О влиянии

меркантилизма на добычу сырья в XVIII веке» представил профессор Вейс; пятый – под названием «Бенедикт Герман и его работа на князей Шварценберг» сделала архивариус замка Мурау Келлнер.

После двух докладов была объявлена пауза. В соседнем зале были красиво накрыты высокие под белыми скатертями круглые столы: чай, кофе, бутерброды, пирожные. Во время перерыва я познакомился с профессором Флюгелем, сфотографировались – 86-летний рыхловатый, флегматичный старец; похвалил его книгу о Германе, сказал, что привез ему копию формуляра Германа из Свердловского государственного архива. Поговорил с профессором Сперлем, спросив его, когда будет мой доклад (поле обеда) и какова его продолжительность. Прослушав доклад профессора Кёстлера, все спустились в ресторан Lercher на двухчасовой обед.

Во время обеда – вкусного и обильного и, конечно, с местным пивом – я решил два важных вопроса. Во-первых, я рассказал профессору Колбу об леобенском минералогe Феликсе Корну, который, будучи восхищен результатами исследований коллоидных соединений, выполненных первым ректором Уральского горного института Петром Петровичем фон Веймарном, назвал в его честь первооткрытый коллоидный минерал веймарнитом. Колб об этом не знал, и я попросил его разыскать мне биографические сведения о Корну. Колб обещал мою просьбу исполнить. Во-вторых, я попросил Колба устроить мне поездку в Леобен и проводить до аэропорта. Исполнить вторую просьбу оказалось затруднительно. Это меня обескуражило. Но Лене все же удалось уговорить Колба, и он согласился довезти меня на своей машине до Леобена, устроить в гостиницу, на следующий день показать Леобен и Горный университет, а вечером посадить на поезд

до Вены. Далее я на такси уж доеду до аэропорта. Я воспрянул духом.

После обеда мы прослушали еще два доклада, и профессор Колб предоставил слово мне и Лене, сказав, что

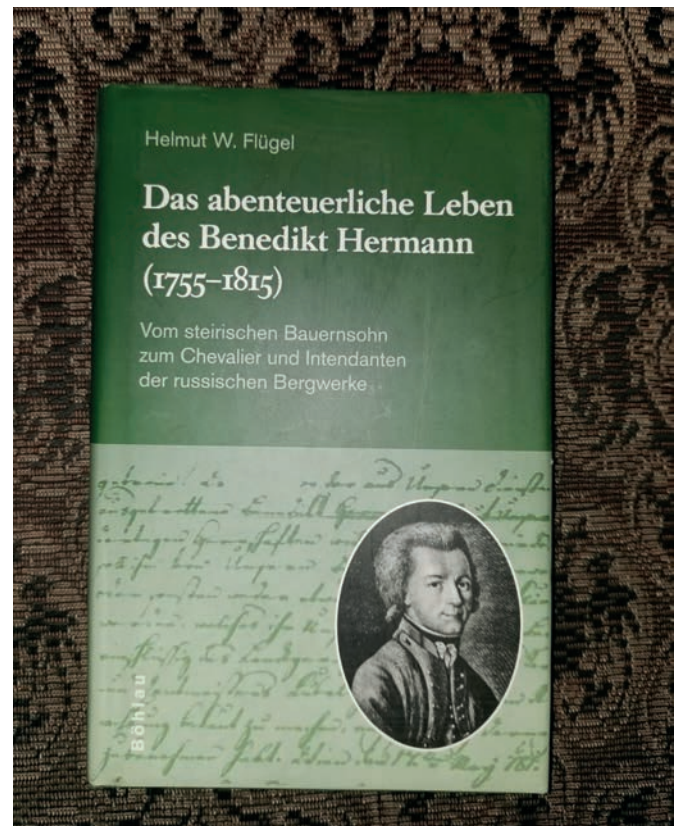


Фото 12. Книга Г. Флюгеля о Германе



Фото 13. Рисунок И. Ф. Германа, выгравированный на первом слитке золота, выплавленном из золота Крылатовского месторождения в 1804 г.

инициатором нынешней конференции являюсь я. Меня это заявление удивило, но я возражать не стал. Профессору виднее. Лена очень разволновалась. Мы с ней вышли к кафедре. Я поблагодарил всех за лестное для меня приглашение; польстил еще раз Флюгелю, сказав, что восхищен его книгой; что рассказывать о Германе после того, что о нем написал профессор Флюгель, это все равно, что выступать после великого Моцарта. Собравшимся очень понравился этот пассаж, и они дружно мне поаплодировали. Потом, не растекаясь мыслью по древу, я говорил не о частностях, а об огромном идейном, мировоззренческом и просветительском значении научного творчества Ивана Филипповича Германа, т. е. о том, о чем не написал профессор Флюгель, оценивший его жизнь как авантюру, не рассказали участники конференции. Завершая выступление, я передал профессору Сперлю свои книги и прокомментировал их содержание [3–9].

Волнение окончательно улеглось, особенно во время очередной кофейной паузы; ко мне подходили, расспрашивая о Горном университете, об уральских самоцветах и о многом другом.

Конференция закончилась докладом архивариуса Келлнер о владелице замка Анне Нойман и о выставках, которые устраиваются в замке; потом была экскурсия по замку и в домовую церковь.

К вечеру потемнело, подул ветер, стало прохладно, но зато теплым и дружеским было расставание. Мы с профессором Колбом отправились в Леобен. Заморосило. Заехали в небольшой городок, чтобы посмотреть на церковь, перестроенную из римского храма. Около 7 часов были в Леобене. Мне был забронирован уютный номер 231 в гостинице Kindler в центре города на берегу Мура. Пожелав друг другу "Gute Nacht", мы с профессором расстались до утра.

Проснулся рано, моросит дождь, туман, тихо. Плотно позавтракал и спустился на ресепшен; рассказал дежурной, кто я, кого жду и куда лечу. Около 10 часов приехал профессор Колб, предусмотрительно захватив мне зонт, и мы поехали в университет.

Леобенский университет не принадлежит к числу старейших в Европе. История его неприхотлива и связана с деятельностью известного австрийского горного деятеля и металлурга Петера фон Туннера (1809–1897). Фон Туннер – выпускник Венского политехнического института; в 1832 г. был начальником металлургического завода в Мурау; несколько лет изучал преподавание горных наук в различных высших учебных заведениях Европы; в 1835 г. создал кафедру металлургии в Техническом университете в г. Граце; в ноябре 1840 в коммуне Фордернберг вблизи Леобена была открыта горно-металлургическая школа, и фон Туннер стал ее преподавателем, а в 1849 г. перевел эту школу в Леобен, в которой в это время было только 48 студентов; в 1861 г. школу преобразовали в академию, а в 1904 г. – в университет. Фон Туннер до 1880 г. возглавлял Леобенскую академию. В 1911 г. Леобенский университет окончил единственный россиянин Дмитрий Львович Ортенберг, который в 1919–1920 гг. был доцентом в Уральском горном институте, он положил начало преподаванию в вузе магниторазведки [10]. Для профессора Колба это было новостью.

Была пятница, поэтому университет оказался безлюден. Профессор Колб – он обогатитель – показал свои лаборатории, познакомил с единственным бывшем на кафедре сотрудником; мы прошли по узким коридорам старого здания университета; зашли в библиотеку – невелика, скромная подборка книг по геологии на русском языке 60-х годов издания; профессор Колб заказал через Интернет биографическую справку о Ф. Корну. Мы вышли из университета к скверу, в котором установлен бронзовый памятник Петеру фон Туннеру. Я рассказал профессору Колбу, что Туннер был на Урале и в Екатеринбурге. В 1870 г. он был приглашен российским правительством на мануфактурную выставку, которая проходила в Санкт-Петербурге. После выставки ему разрешили побывать на уральских и южно-российских металлургических предприятиях для их технического обзора. По материалам осмотра заводов он написал книгу, которая была переведена и издана в России в 1872 г., имела большой интерес у российских металлургов [11, 12]. После моего рассказа профессор Колб коротко бросил о фон Туннере: "Verrater!", что значит предатель. На мой вопрос, почему фон Туннер предатель, он промолчал.

Из сквера профессор Колб провел меня в современное, из стекла, здание геологического факультета, и я полюбовался великолепными минералогическими коллекциями. Потом была прогулка по городу, случайная встреча на центральной площади со вчерашними участниками конференции, трапеза в ресторане, во время которой мы поговорили с профессором о разных разностях – от качества русской и польской водки до антидемократичности современной церкви. Из ресторана прошли на автостоянку к университету. В салоне автомобиля лежали мой железнодорожный билет, биографическая справка о Ф. Корну и схема конечной железнодорожной станции, на которой я буду пересаживаться на такси до аэропорта.

Знакомство с Леобеном завершилось поездкой в промышленный район города: чистый и аккуратный, как кухня австрийской хозяйки; профессор Колб показал мне и свое небольшое обогатительное предприятие, и уже за городской чертой я увидел пример того, как в Австрии осуществляют рекультивацию территории после горных работ.

Дальше наш путь лежал в городок Брук-на-Муре, в котором живет мой ментор. На центральной площади городка мы спустились на подземную парковку. Вышли на поверхность. Погода разгулялась. На площади проходило какое-то веселое мероприятие. Профессор Колб показал мне достопримечательности городка, здороваясь направо и налево со знакомыми и представляя им меня; купил мне буклетов, напоил на дорожку кофе, и в начале четвертого мы были на вокзале. Обнялись на прощание, и я поднялся в вагон. Сидячее купе на шестерых. Сел у окна, помахал рукой профессору Колбу. Поезд бесшумно и мягко тронулся. Мои соседи: три угрюмых мужчины и женщина. За два часа езды они не только не перемолвились между собой, но, кажется, не изменили и поз. Я легко нашел стоянку такси и через полчаса был в гудящем венском аэропорту.

Таким образом, все мои волнения были напрасными. Узнав, где и когда будет посадка на московский рейс,

я прошелся по магазинам, купил коробку конфет Mozart в форме скрипки и уселся поудобнее глазеть на публику и ждать начала регистрации. Подсели какие-то два малоразговорчивых уральца, сетовавших на то, что между прилетом самолета в Шереметьево и вылетом самолета в Екатеринбург чуть более часа; успеем ли? Около 10 часов объявили регистрацию. Потом начался паспортный контроль и досмотр багажа. Австрийские таможенники были «строги и грубы» до неприличия. Наконец наше унижение закончилось, и в первом часу ночи, ровно по расписанию, мы вылетели в Москву.

Спать не хотелось: газета, кроссворд, вкусный ужин – Аэрофлот на высоте! Прилетели вовремя. В Шереметьево прохладно, пасмурно, моросит дождь, длинная очередь на паспортный контроль, опять волнение; скорым шагом добежал до нужного терминала, снова регистрация, досмотр багажа, раздевание почти до носков – наконец, все, можно передохнуть. Вылетели по расписанию, скудный завтрак, в 11 часов приземлились в Кольцово. Тихо, тепло, неяркое солнце – чудесный опаловый день уральского бабьего лета. Автобус, трамвай, и я, наконец, дома, где и солома едома.

Профессор в Вене

Жизнь И. Ф. Германа была поделена на две неравные части; меньшую он прожил на родине в Австрии, большую – в России. Образно говоря, если его жизнь на родине была посвящена в основном собиранию камней, то вторая в России – главным образом их разбрасыванию [13].

Он родился 3 марта (здесь и далее все даты даны по ст. ст.) 1755 г. в г. Мария-Хоф, расположенном в горнопромышленной провинции Штирия. Его отец был чиновником, служившим в системе управления княжеством Шварценберг, а не «бедным крестьянином, возделывавшим горные склоны» Альп [1]. Рано проявившиеся способности и другие достоинства стали основой для успешной деятельности Германа: окончив школу в Мурау, он затем стал учиться в доминиканской школе во Фризахе. Его восхождение к вершинам наук и профессионализма шло без перерыва и задержек. После окончания доминиканской школы он был направлен в Аусзее для изучения соляной промышленности, а затем ему доверили работу в пенсионном ведомстве в Мурау, а позже в конторе в управлении княжества в г. Граце. В Граце уже был университет, и Герман стал его посещать, изучая языки. В Мурау он вернулся еще раз для того, чтобы познакомиться с работой местных железодельных и сталелитейных заводов.

В 1777 г. в возрасте всего 22 лет Герман получил существенное повышение по службе: он был переведен в Вену в главное управление княжества и в течение двух лет состоял главным кассиром княжества, т. е. он был главным финансистом у Шварценбергов.

Достигнув относительной самостоятельности и финансовой независимости, Герман использовал их для учебы в Венском университете, для совершенствования знаний в области минералогии, горного дела и химии. В 1781 г. он для этого совершил поездки на горные предприятия Германии, Венгрии и Италии. В Венгрии он учился в горной академии в Шемнице.

Мировоззрение Германа и его научно-практические интересы были широкими и социально ориентированными

и не ограничивались только горным делом, металлургией и геологией. Он занимался вопросами государственного управления, политической арифметики – вообще статистики. Этим вопросам была посвящена его первая книга «Очерки физических свойств австрийских земель и современного состояния в них сельского хозяйства, промыслов, мануфактур, фабрик и торговли», опубликованная в 1782 г., в которой он утверждал, что хорошее землеописание, особенно политико-экономическое, важно и для министра, и для купца, а свобода мысли способствует уничтожению предрассудков и благоприятствует высокой индустриализации страны. Позже, в России, эти идеи получили существенное развитие.

Учеба в университетах и в академии, поездки по Европе убедили его в том, что он вполне готов создать кафедру технологии в Венском университете. Но вместо кафедры ему разрешили лишь чтение курса лекций по технологии. Таким образом, Герман стал профессором столичного университета без кафедры. Его лекции, правда, успехом не пользовались, хотя он для студентов издал учебное пособие «Введение к учению о технологии» [14]. Ранее, в 1780–1783 гг., Герман стал публиковать в виде трехтомника результаты своего путешествия по Австрии [15], а также намерен был описать сталелитейное производство княжества Шварценберг в Штирии. Но такая самостоятельность не понравилась владельцам княжества. Объяснение запрета было понятным. Наступающий XIX век был веком стали. А на предприятиях в Штирии использовались для выплавки стали достаточно совершенные технологии, секретами которых владельцы княжества делиться ни с кем не собирались. Конфликтную ситуацию Герман разрешил уже испытанным способом: он отправился в поездку в окрестности Кракова якобы для осмотра тамошних соляных рудников. Из Кракова он переехал в Варшаву, а из Варшавы с помощью некоего минералога И. Карози – в Санкт-Петербург.

Академик в Санкт-Петербурге

Переезд Германа в Россию, вероятно, был не спонтанным и уж, во всяком случае, не авантюрным, каким оценил его профессор Флюгель. А фронт с кафедрой в Венском университете, конфликт со Шварценбергами и некоторые другие обстоятельства, возможно, убедили его в том, что его научная деятельность на родине будет затруднена, как и в Европе тоже, где полным-полно собственных честолюбцев. Он посмотрел окрест и остановил свой взор на великой России с ее пугающе огромной территорией, немереными природными ресурсами, гигантским количеством нерешенных проблем и задач и с невысоким уровнем просвещенности народа. Вот страна, где можно реализовать любые замыслы. И Герман отправился в Россию. Поступок смелый, поступок не мальчика, но мужа. Но Герман был уверен в себе. Он во всем, что бы ни делал, был смел и уверен в себе. И уже ближайшее будущее показало, что он не ошибся в своем выборе.

«Приехавши вояжиром в Санктпетербург вступил в Российскую службу корреспондентом Санктпетербургской академии наук 1782 3 января» [2] на вакантное место умершего незадолго до этого минералога Мосенкова [2]. Остается только гадать о том, кто и за какие заслуги помог

Ивану Филипповичу так скоро стать членом-корреспондентом Императорской Академии Наук?

А события между тем развивались своим закономерным чередом. 16 августа 1783 г. «по имянному высочайшему повелению (Герман был. – В. Ф.) послан в Сибирь для обозрения и описания казенных по Уральскому хребту находящихся рудников и заводов, и для *выбрания места к заведению стальной фабрики в России (курсив В. Ф.)*» [2]. Это было первое путешествие Германа по России.

14 лет спустя Герман вспоминал: «13 сентября 1783 года стало началом моего путешествия по земле, лишь упоминание о которой у некоторых людей вызывает ужас. Да и я покидал этот великолепный императорский город (т. е. Санкт-Петербург. – В. Ф.) не без чувства опасности ...» [16, 17]. Но действительность оказалась иной. Сибирь и Урал были не безлюдными; там были города и веси, и там Герман постиг суть русской поговорки, что не так страшен черт, как его малюют. В Сибири, например, на Барнаульском заводе у него родился в 1789 г. старший сын Фридрих (Федор). Не от страха же произвела сына жена Елизавета Гавриловна, дочь кавалера и тайного советника, в будущем сенатора Г. С. Качка. Всего у супругов Герман было семь детей: две дочери и пять сыновей, четверо детей пережили отца.

В двухтомной книге [17], которая так и не была переведена, Герман изложил подробнейшее описание многих уральских месторождений и дал характеристику более сотни минералов, систематизировал все имевшиеся к тому времени сведения о породах, рудах и минералах, а в последнем, общегеологическом разделе книги, осветил свое представление о происхождении Уральских гор и о геологической истории Земли с нептунической позиции.

Свою гипотезу образования гор он назвал «центробежной» и утверждал, что все рудные жилы беднеют вглубь, объясняя это свойство тем, что заполнение жил происходило сверху в начальный период образования Земли под действием центробежной силы. Герман полагал, что первоначально Земля представляла собой каплю жидкости, находившуюся в первозданном хаосе. Благодаря вращению Земли началась дифференциация – расслоение вещества: легкая жидкость опустилась к центру планеты, а тяжелая поднялась к поверхности, образовав земную кору. Поэтому руды сосредоточились у поверхности, главным образом у экватора, где центробежная сила имеет максимальную величину.

Спустя два года эту гипотезу под своим именем опубликовал профессор Фрайбергской горной академии А. Г. Вернер. Возник конфликт, и Герману пришлось отстаивать свой приоритет.

В Ильменах Герман впервые нашел амазонский камень зеленовато-голубого, почти бирюзового цвета. А. Е. Ферсман, посетивший эту старинную копь (копь № 64 в квартале 178 [18]), писал, что «он (амазонит. – В. Ф.) отличал на солнце, а цвет его был так прекрасен, что было приказано добыть его для Екатеринбургской минеральной фабрики и из лучших сортов вытачивать вазы» [19].

Словом «впервые» следует характеризовать многие открытия, сделанные Германом на Урале. Так, впервые он дал описание проявления вольфрама в районе Боёвки в окрестностях села Ларинского [17] в почковидных кон-

крециях флюорита: «Там и тут в него (флюорит. – В. Ф.) вкраплены лучистые или призматические ... кристаллы быстро кристаллизовавшегося вольфрама ... До сих пор выход только этой жилы относительно хорошо расшурфован, но дальше она не прослежена. Стоит очень приложить усилия, чтобы многое доделать, так как все признаки указывают на богатые руды» [17]. К сожалению, эта рекомендация Германа была реализована только в начале Первой мировой войны, и она привела к открытию вольфрамоносной провинции [20].

Во время первого и четырех последующих путешествий по Сибири и Уралу в 1785, 1794, 1801 и 1811 гг. Герман собрал для Академии наук огромную минералогическую коллекцию. Поэтому неслучайно В. И. Вернадский, очень требовательный в оценке научной деятельности коллег, оценивая вклад Германа в описательную минералогию, назвал его одним из крупнейших минералогов Европы конца XVIII в.

Надо ли говорить, что «высочайшее повеление» было исполнено Германом также на высочайшем уровне. Императрица Екатерина II отблагодарила достойно Ивана Филипповича. 16 декабря следующего года после его возвращения в Санкт-Петербург он был «высочайшим повелением» пожалован в надворные советники и определен директором Пышминской стальной фабрики. А ближайшая наперсница императрицы княгиня Е. Р. Дашкова, директор Санкт-Петербургской Императорской академии наук, назначила ему пенсию в 200 рублей в год. И каким суетным и мелочным на фоне императорских милостей выглядело предложение, сделанное Герману из Австрии, стать администратором домена в Ламберге, от которого он, конечно же, отказался.

Чин надворного советника – это гражданский чин 7 класса в Табели о рангах Российской империи, дававший право на потомственное дворянство и обращение: «Ваше высокопревосходительство». Значение Пышминской стальной фабрики было огромно и для экономики, и для обороноспособности расширявшей свои пределы страны. Об этом, в частности, свидетельствует описание детища Ивана Филипповича, занимающее в его формуляре почти пятую часть:

«Он сию фабрику учредил по методе штейермакских стальных заводов для делания плавленной стали из чугуна, и пустил в совершенное действие. Следуя сей методе и поныне (т. е. в 1804 г. – В. Ф.) выделка пружинной стали на Екатеринбургских заводах с немалою выгодой против протчих подобных заведений производится; о чём между протчим тульская казенная палата ... отозвалась, что сталь не токмо дешевле ныне делаемой казне обойдётся, но и имеет в ней необходимую надобность, которую в доброту почитает она на дело оружия отличного и не хуже заморской; по чему доставка сей стали в Тулу и ныне производится; из сей же стали он (Герман. – В. Ф.) учредил начало делания сенокосных кос яко одного из важнейших инструментов для России и по сию пору из чужих краёв ввозимых ...» [2].

Первое путешествие на Уральские заводы, создание стальной фабрики, в управлении которой Герман оставался до 1794 г., стали мощной заявкой для продолжения его плодотворной многолетней ревностной деятельности

во благо России. В 1785–1786 гг. он совершил путешествие на Алтай для изучения месторождений, являвшихся базой Колыванских рудников и горных заводов. Результаты путешествия на Алтай были оценены в сентябре 1786 г. «произведением в почетные члены императорской Санкт-Петербургской академии наук»; спустя четыре года Герман был «определен сей академией ординарным академиком по кафедре минералогии» [2].

Именно в этом 1790 г. Герман опубликовал замечательную книгу, но теперь не по австрийскому, а по российскому государственоведению: «Статистическое описание России в отношении населения, свойств земли, естественных продуктов, сельского хозяйства, горного дела, мануфактуры и торговли» [21]. Материалы для книги он собирал в течение восьми лет, объехав по служебным обязанностям горнозаводские районы Сибири. Книга [21], по мнению советского ученого М. В. Птуха [22], «была крупным явлением в истории статистики. Этот труд имеет в известной мере научно-исследовательский характер. Этому содействовало не только стремление автора лично собрать на местах и в государственных учреждениях новые материалы, использовать разные рукописи. Герман обладал довольно редким даром ученого того времени – смело ставить новые проблемы. Так, в его работе впервые в русской литературе поставлен и разрешен весьма важный вопрос об исчислении народного дохода, причем Герман выявил себя подлинным политическим арифметиком. Политическим арифметиком был он и при исчислениях вероятного населения России на разные даты».

В более поздних работах, например, в книге «О составлении народных таблиц» [23], Герман сформулировал принципы однодневной переписи населения, которая впервые в России была проведена только спустя 100 лет – 28 января 1897 г.

Два тяжелейших путешествия по стране, в которой вместо дорог тогда были только направления, далекая от комфорта жизнь в Екатеринбурге и большая семья неблагоприятно сказались на здоровье, и Герман обратился с прошением к императрице освободить его от управления стальной фабрикой, оставив лишь в должности академика. Прошение было удовлетворено, и Герман с семьей в 1794 г. вернулся в столицу.

Смерть в 1796 г. императрицы Екатерины II и восшествие на престол ее сына Павла I только упрочили положение Германа: в сентябре 1798 г. он был определен Правительствующим Сенатом в члены Берг-коллегии, а в мае следующего года именованным указом был пожалован в коллежские советники и «в следствие предложения бывшего государственной берг-коллегии главного директора, господина действительного тайного советника и кавалера Михаила Фёдоровича Соимонова, отправлял он с 27 июля 1799 г. по 1 декабря 1800, купно с прочими его должностями и должность инспектора горного корпуса» [2].

В течение короткого четырехлетнего правления императора Павла I в жизни Германа произошли еще два важных события.

В августе 1800 г. во время наводнения едва не были разрушены Петрозаводск и Александровский пушечный завод [24]. Город и завод были спроектированы и построены выдающимся горным деятелем, уральцем

А. С. Ярцовым [25]. Предвидя возможность наводнения, Ярцов предусмотрел в заводской плотине прорези для сброса паводковых вод. Но при перестройке плотины в 90-х годах, когда директором Олонекских заводов был выдающийся английский металлург К. Гаскойн, прорези закрыли. Завод был спасен только потому, что во время наводнения был срочно прорыт канал для сброса воды. В сентябре Берг-коллегия командировала в Петрозаводск Германа для «осмотра и обревизования олонекских пушечных заводов».

Иван Филиппович не только оценил состояние заводов и плотинного хозяйства, но дал рекомендации по работе горнозаводской школы, в которой поприносил участие на экзамене. «Ученики, – по мнению Германа, – писали и читали на русском и латинском языках и отвечали с хорошим успехом по закону божьему и арифметике». Руководству заводами он предложил включить в штат школы еще двух учителей и разделить школу на три отделения: в первых двух учить грамоте и арифметике, а в третьем – геометрии. Сделал он замечание и Гаскойну, отметив, что награждение мастеровых осуществляется единолично директором и поэтому невозможно по делам установить истинные размеры вознаграждения.

Такие вмешательства в управление заводами очень не понравились честолюбивому англичанину, и поэтому, например, вопреки Герману, школьная программа была не усовершенствована, а существенно сокращена и обучение было ограничено только чтением, письмом и законом божьим.

Буквально на излете царствования Павла I Герман представил ему сочинение о сибирских рудниках и заводах [26] и за «отличные его по горной части знания и опытность» император пожаловал Германа чином 5 класса – чином статского советника. Императорский указ об этом помечен 5 февраля, а в ночь 12 марта Павел I был убит заговорщиками в своей опочивальне.

Книга [26], как и подавляющее большинство работ Германа, давно уже представляют интерес только для историков геологии и горного дела в Сибири. Тем не менее отмечу, какое значение она имела для специалистов в свое время. В этой книге Герман обосновывал идеи о многократности тектонических процессов Восточного Забайкалья, описал явление придонного оледенения в реках региона, дал объяснение закономерностей асимметрии склонов гор, по-разному ориентированных по отношению к странам света в зависимости от степени инсоляции и т. д.

Начало царствования императора Александра I – это начало нового и очень важного этапа в жизни и деятельности Германа. Коронация Александра I состоялась 15 сентября, а 20 ноября «по именному высочайшему указу» Герман был проведен в обер-берг гауптманы 4 класса и отправлен главным начальником Екатеринбургского горного начальства и монетной экспедиции, оставаясь при этом академиком и членом Берг-коллегии, с окладом жалованья 3589 рублей: «3000 – из определенной по штату начальство и 589 – на счёт всех заводов и монетного двора из заводских сумм» [2]. Предшественником Германа во главе уральской горной администрации был А. С. Ярцов [23].

В 10-тысячный Екатеринбург Герман приехал в январе 1802 г. Главным начальником он оставался до 1812 [12]

или до 1813 г. [27], когда по болезни вынужден был выйти в отставку. Эти десять лет были очень плодотворными и для Германа, и для Урала, и для России.

На следующий год в окрестностях Екатеринбурга крестьянином Андреем Крылатковым было открыто богатое золоторудное месторождение, названное Чусовским, и Герман в сентябре «имел счастье доносить» об этом «Его Императорскому Величеству, представя при этом и сам слиток из руд сплавленный, золота». Государь «Император приемля сие приношение следствие трудов заботы и попечения его главного начальника, в знак монаршего своего благоволения, пожаловать ему соизволил перстень, украшенный бриллиантами и с вензелем Его Императорского Величества» [2]. Открытие чусовского золота было очень своевременным. Хотя, когда открытие золота было бы несвоевременным. Россия же тогда стояла на пороге тяжелейших событий и великих экономических и материальных трат – сначала это было противостояние на дальних рубежах с Наполеоном, а затем оно перешло в Отечественную войну с коалицией европейских государств, объединенных Наполеоном.

Администратор Герман управлял горными предприятиями не по-чиновничьи, т. е. руководствуясь принципом «тащить и не пущать», а только экономической и социальной целесообразностью. Поэтому он осуществил замену приписных крестьян неременными работниками, реорганизовывал органы горнозаводского управления, вводил на рудниках и заводах технические новшества, совершенные технологии, следил за соблюдением техники безопасности, за исполнением пенсионного обеспечения горняков, за их продовольственным снабжением, за соблюдением судебных и правовых норм; он создавал больничные учреждения и дома престарелых, ввел оспопрививание, развивал горнозаводские школы. В 1803 г. им впервые на Урале и в Сибири была создана типография со всем необходимым оборудованием, но только с одним печатным станком. Но, как говорится, лиха беда начало. В типографии печатались не только официальные документы, она была и своеобразным личным издательством Германа, по заданию которого Н. И. Платонов – унтершхтмейстер Екатеринбургской золотопромывальной фабрики, состоявший также при гравировальном классе горной школы, выгравировал в 1810 г. на меди оригинальный портрет Ивана Филипповича. Этот портрет хранится в формуляре Германа [2].

Герман кроме немецкого и русского знал французский, итальянский и латинский языки. Скрупулезный Вампрехтсамер подсчитал, что Герман опубликовал 59 работ, из них 14 на русском языке. Полная библиография работ Германа приведена в [13]. Две фундаментальные книги историко-аналитического характера: «Описание заводов, под ведомством Екатеринбургского горного начальства состоящих» [28] и «Историческое начертание горного производства в Российской империи» [27] были напечатаны в Екатеринбурге. В названии книги [29] Герман, отнюдь не хвастаясь, своеобразно подвел итог своей деятельности в России и ее объективной оценки, которая ей была дана в России и в Европе. Эта оценка перечеркивает мнение профессора Флюгеля и других историков об авантюристности жизни Германа. Вот как Герман назвал книгу [29]:

«Историческое начертание Горного производства в Российской империи. Сочинено Обер-Берг-Гауптманом 4-го класса и ордена святой Анны кавалером, Екатеринбургских горных заводов начальником и Императорской Санкт-Петербургской, Королевской Берлинской, Стокгольмской и Минхенской Академий наук, также Королевских Копенгагенского, Геттингенского и Прагского обществ наук, Берлинского и Московского обществ испытателей природы, Енисейского Минралогического, Московского Физического и Санкт-Петербургского, Австрийского и Штейэрмаркского Экономического обществ Членом Иваном Германом».

Это эпитафия на все времена.

Начало правления императора Александра I было ознаменовано проведением умеренно-либеральных реформ, в том числе были осуществлены значительные преобразования и горнозаводской промышленности. В январе 1802 г. из Берг-коллегии в Екатеринбург был прислан указ о сборе различных сведений и всех узаконений по горной части для составления «Проекта горного устава». К составлению этого документа были привлечены многие выдающиеся горные деятели, в том числе А. С. Ярцов, тайный советник, тесть Германа Г. С. Качка, сам И. Ф. Герман с его богатейшими данными о горной промышленности, горный начальник Гороблагодатских горных заводов А. Ф. Дерябин и другие. Законотворческая работа завершилась 13 июля 1806 г., когда Александр I утвердил «Горное положение для управления заводов хребта Уральского», и оно было с минимальными изменениями включено в первое издание Свода законов Российской империи и на многие десятилетия стало регламентировать работу горнозаводской промышленности страны.

Наследство Германа-ученого и горного деятеля – это книги, в которых он описал свои наблюдения, открытия, идеи, гипотезы и теории, проекты – реализованные и нереализованные: все это достояние потомков. Наследство Германа-человека – это его дети. Их у него и Елизаветы Гавриловны было семеро. Дочери не в счет. Сыновья избрали горную стезю. Наиболее успешной она стала для старшего – Фридриха [30]. Он окончил Горный корпус, служил при отце. Но когда отец умер 31 января 1815 г., Фридрих Иванович уволился из горного ведомства. В 1817–1823 гг. он служил под началом Оренбургского военного губернатора П. К. Эссена, на которого якобы имел сильное влияние и потому был переведен в армию. Имел чин полковника. Современники характеризовали его как человека необыкновенного ума, больших способностей и благородства. Он умер в 1852 г. после тяжелой и продолжительной болезни, и был похоронен, как и отец, в Санкт-Петербурге на Волковском иноверческом кладбище.

Послесловие

В истории науки нечасто бывают ситуации, когда ученый, вынужденный волей обстоятельств покинуть свою родину, добивается выдающихся результатов и всеобщего признания на чужбине, которая становится для него второй родиной – страной, где рождались его дети, а сам он обретал вечный покой. Еще реже такое происходит на рубеже веков, грань между которыми всегда имеет не только временное значение, но, что важнее всего, определяет

смену мировоззрения и миропонимания людей, смену их ментальности и научной парадигмы.

Именно таким ученым был Бенедикт Франц Иоганн Герман, принадлежавший в равной мере двум империям: Австро-Венгерской и Российской. Его мировоззрение сформировалось в XVIII в. – веке просвещения, а практическое воплощение своих идей и замыслов он осуществил в конце XVIII–начале XIX в. – века научно-технической революции.

По образному сравнению испанского философа Хосе Ортеги-и-Гассета: «... Девятнадцатый век выводили на дорожку специалисты, чей кругозор был энциклопедическим. Но от поколения к поколению центр тяжести смещался, и специализация вытеснила в людях науки целостную культуру» [31]. Узкий профессионализм вытеснил, в конце концов, из менталитета людей целостное восприятие культуры. Это явилось результатом объективного процесса углубления и расширения представлений об окружающем мире, когда даже гениальный ученый не в состоянии охватить и постичь его весь целиком во всем многообразии форм, видов, связей и взаимоотношений. Платой за утрату людьми целостной картины мира стало обрете-

ние ими возможности сверхкрупного изучения его фрагментов и деталей. Классический естествоиспытатель в XIX в. перестал существовать. Его место занял сонм узких специалистов, и наука была втиснута в узкие рамки практицизма, утратив интеллектуальный романтизм.

Герман жил и творил в благодатное время, время таких светочей мысли, как А. фон Гумбольдт, П. Лаплас, И. Кант, М. В. Ломоносов и многих других, развивавших и отстаивавших представления о естественнонаучной модели рациональности, которая им казалась единственно возможной. Ум Германа любил простор, а не ранжир; он не терпел никаких рамок и ограничений. В России он получил то, чего не имел на родине, – почти неограниченную свободу творчества, и этой свободой он воспользовался сполна, изучая Россию в политико-статистическом, экономическом, геолого-географическом, историческом и других аспектах.

Герман в отличие от легендарного Одиссея не вернулся на родину. Его прах покоится в российской земле, которую он так ревностно изучал. Память о Германе подобно многоцветной радуге-арке перекинулась через весь европейский континент, опираясь на молодые Альпы и древний Урал.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вампрехтсамер Х. Бенедикт Франц Иоганн Герман – великий австриец в России (1755–1815) // Известия вузов. Горный журнал. 1995. № 8. С. 192–197.
2. Государственный архив Свердловской области (ГАСО), ф. 24, оп. 12, д. 2412, лл. 244–245.
3. Филатов В. В. «Отечества пользы для ...» (75 лет Уральскому горному институту. 1917–1992). Екатеринбург: Уральский рабочий, 1992. 408 с.
4. Филатов В. В. Тайны горного ведомства. Екатеринбург: Изд. дом ПАКРУС, 2000. 144 с.
5. Филатов В. В. Стрела времени: очерки истории горного дела Урала. Екатеринбург: Изд-во УГГГА, 2002. 308 с.
6. Филатов В. В. Тайны Каменного пояса. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2008. 267 с.
7. История создания и становления Уральского геологического музея / В. В. Филатов [и др.]. Екатеринбург: АМБ, 2003. 276 с.
8. Путешествие в мир камня. Музей истории камнерезного и ювелирного искусства / сост., науч. ред. проф. В. В. Филатов. Екатеринбург: Изд. дом «Автограф», 2007. 320 с.
9. Филатов В. В. Профессора Уральского государственного горного университета. 4-е изд., испр. и доп. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2009. 479 с.
10. Филатов В. В. «Быть по сему!»: очерки истории Уральского государственного горного университета (1914–2014). 1720–1920. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2014. 684 с.
11. Туннер П. фон. Горнозаводская промышленность России и в особенности ее железное производство. СПб: Тип. В. Демакова, 1872. XVIII. 247 с.
12. Козлов А. Г. Творцы науки и техники на Урале XVII–начало XX века. Свердловск: Сред.-Урал. кн. изд-во, 1981. 224 с.
13. Русский биографический словарь: Герберский–Гогенлоз / изд. под ред. Н. М. Чулкова. М.: Тип. Г. Лисснера и Д. Совко, 1916. Т. 5. 442 с.; с. 49–51.
14. Hermann B. F. I. Ueber die Einfuehrung des Studiums der Technologie. Wien, 1781.
15. Hermann B. F. I. Reisen durch Oesterreich, Steiermark, Kamthen u.s.w. Wien, 1780–1783.
16. Hermann B. F. I. Mineralogische Reisen in Sibirien vom Jahre 1783 bis 1796, Bd 1–3, St. Peterburg, 1797–1801.
17. Hermann B. F. I. Versuch einer mineralogischen Beschreibung des Uralischen Erzgebirges, Bd 1–2, B.-Stettin, 1789.
18. Березин Б. А. Путеводитель по Ильменскому государственному заповеднику. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1935. 93 с.; с. 54.
19. Ферсман А. Е. Самоцветы России. Петроград: Природа, 1921. Т. 1. 212 с.
20. Филатов В. В. Уральский вольфрам: история открытия // Уральский геологический журнал. 2005. № 2(44). С. 139–154.
21. Hermann B. F. I. Statistische Schilderung von Russland, in Rucksicht auf Bevolkerung, Landesbeschaffenheit, Naturprodukte, Landwirtschaft, Bergbau, Manufakturen und Handel. St. Peterburg, 1790.
22. Птуха М. В. Очерки по истории статистики в СССР. Т. 1. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 471 с.; с. 121.
23. Герман И. Ф. О составлении народных таблиц. Екатеринбург, 1808. 23 с.
24. Балагуров Я. А. Олонечские горные заводы в дореформенный период. Петрозаводск: ГИЗ Карельской АССР, 1958. 211 с.
25. Филатов В. В. Продолжение прогулки // Старая столица: краеведческий альманах. Вып. 12 / МБУК «Центральная городская библиотека» г. Владимир, отдел краеведческих исследований. Владимир: Транзит-ИКС, 2018. С. 50–59.
26. Герман И. Ф. Сочинения о сибирских рудниках и заводах. СПб, 1797–1801. Ч. 1–3.
27. Уральская историческая энциклопедия. Екатеринбург: Изд-во «Екатеринбург», 1998. 621 с.; с. 143.
28. Описание заводов, под ведомством Екатеринбургского горного начальства состоящих. Екатеринбург: Типогр. Екатеринбургских горных заводов, 1809. Ч. 1–2. 388 с.
29. Историческое начертание горного производства в Российской империи. Екатеринбург, 1810. Ч. 1. 223 с.
30. Русский биографический словарь. 442 с.; с. 62.
31. Ортега-и-Гассет Х. Избранные труды. М., 1997. 704 с.; с. 107.

Статья поступила в редакцию 18 сентября 2023 года

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-supergrain 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, ln, 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

Исидару 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 // *Известия 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 Applied 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 высланных рукописей мы публикуем на нашем сайте, а также на последней странице 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 identification) – 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 ООО «НЭИКОН ИСП», 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.

На обложке: фото терсенита – природного аналога рукавишниковита
On the cover: on photo tersenite – a natural analogue of rukavishnikovite

Редакция выражает благодарность за помощь в работе журнала

Бараникову Александру Григорьевичу – д-ру геол.-минерал. 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 Парамонова Л. Ю.
Дизайнер Васфилова И. С.
Переводчик Тараньжин Б. С.

Верстка Швецовой Ю. Б.
Корректурa, оформление рисунков Пихтовниковой О. Г.

Подписано в печать 12.12.2023 г. Дата выхода в свет – 15.12.2023 г.
Формат 60 × 84/8. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 21,27. Тираж 120 экз. Заказ № 24
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. 1201
Тел.: (343)283-05-60
E-mail: iuggu-journal@yandex.ru
<https://iuggu.ru>

Отпечатано в типографии:
ООО «Издательство УМЦ УПИ»
г. Екатеринбург, ул. Гагарина, 35а, оф. 2
Тел.: (343) 362-91-16