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 1(53)

2019

Уральский государственный
горный университет

Известия Уральского государственного
горного университета
2019, вып. 1(53)

Ural State
Mining University

News of the Ural State
Mining University
2019, issue 1(53)

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, 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 http://iuggu.ru, in DOAJ, ROAD and in the database of the Russian Science Citation Index of the Russian Universal Scientific Electronic Library.
Website of the journal contains a detailed information about the journal, as well as guidelines for authors.

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

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

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-55055 от 14.08.2013,
выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

Известия Уральского государственного горного университета. 2019, вып. 1(53)
News of the Ural State Mining University. 2019, issue 1(53)

## Учредитель и издатель

**УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

### Главный редактор

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

### Заместитель главного редактора

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

### Ученый секретарь

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

## Редакционная коллегия

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

## Члены международной редколлегии

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

Известия Уральского государственного горного университета. 2019, вып. 1(53)
News of the Ural State Mining University. 2019, issue 1(53)

## Founder and publisher

**URAL STATE MINING UNIVERSITY**

### Editor-in-Chief

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

### Deputy Editor-in-Chief

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

### Academic Secretary

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

## Editorial board

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

## International members

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

# СОДЕРЖАНИЕ

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

**Методы изучения глубинного строения фундамента на основе аэромагнитных данных в восточной части Суэцкого залива, Египет**
С. В. Шиманский, А. Таршан
**(In English)**

**Петрохимические особенности дайкового комплекса Воронцовского золоторудного месторождения (Северный Урал)**
О. Б. Азовскова, М. Ю. Ровнушкин, Е. И. Сорока
**(In English)**

**О химизме турмалина из Многовершинного рудного поля (Хабаровский край, Дальний Восток)**
И. А. Бакшеев, Е. А. Власов
**(In English)**

**Геофизические критерии выделения продуктивных слюдитовых жил Мариинского изумрудно-бериллиевого месторождения (Средний Урал)**
М. П. Попов, О. П. Пелешко, Е. А. Баженова, В. С. Иванченко, В. В. Бахтерев
**(In English)**

**Новые возможности обработки и интерпретации сейсмических данных в оценке перспективности локальных объектов**
Д. К. Ажгалиев, С. М. Исенов, С. Г. Каримов

**Морфология и внутреннее строение природных и техногенных железооксидных микросфер**
М. С. Глухов

**Механизмы и причины изменения формы кристаллов в процессе роста**
Г. И. Страшненко

**Численное моделирование устойчивости лба забоя в зоне неоднородности при недренированной модели массива**
А. В. Алексеев, П. Э. Вербило

**Астероиды, кометы и метеориты – продукты взрыва планеты Фаэтон**
С. Г. Паняк, С. А. Дегтярев

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

**Результаты исследований работоспособности модернизированного оборудования трубоукладчика**
П. А. Корчагин, А. Б. Летопольский, И. А. Тетерина
**(In English)**

**Идентификация механизма тектонических движений земной коры**
Аб. Г. Рзаев, С. Р. Расулов

**Исследование реологических свойств каменной соли**
В. А. Агеенко

# CONTENTS

EARTH SCIENCES

7 **Basement configuration depth methods of airborne magnetic data in the eastern Gulf of Suez, Egypt**
S. V. Shimanskiy, A. Tarshan
**(In English)**

18 **Petrochemical features of the dike complex of the Vorontsovskoye gold-ore deposit (Northern Urals)**
O. B. Azovskova, M. Yu. Rovnushkin, E. I. Soroka
**(In English)**

28 **About chemistry of tourmaline from Mnogovershinnoe ore deposit (Khabarovsk Krai, Far East)**
I. A. Baksheev, E. A. Vlasov
**(In English)**

39 **Geophysical criteria for the separation of productive micaceous veins of the Mariinsky emerald-beryllium deposit (the Middle Urals)**
M. P. Popov, O. P. Peleshko, E. A. Bazhenova, V. S. Ivanchenko, V. V. Bakhterev
**(In English)**

48 **New opportunities for processing and interpreting seismic data in estimating the viability of local objects**
D. K. Azhgaliev, S. M. Isenov, S. G. Karimov

60 **The morphology and internal structure of natural and man-made iron oxide microspheres**
M. S. Glukhov

67 **Mechanisms and causes of changes in the shape of crystals during their growth**
G. I. Strashnenko

80 **Numerical modeling of stability of the forehead of the face in the area of heterogeneity with undrained array model**
A. V. Alekseev, P. E. Verbilo

88 **Asteroids, comets and meteorites – products of the explosion of the Phaethon planet**
S. G. Panyak, S. A. Degtyarev

ENGINEERING SCIENCES

96 **Results of studies for the modernized equipment of a pipelayer**
P. A. Korchagin, A. B. Letopolskiy, I. A. Teterina
**(In English)**

103 **Identification of the mechanism of tectonic movements of the Earth's crust**
Ab. G. Rzayev, S. R. Rasulov

115 **Study of the rheological properties of salt rock**
V. A. Ageenko

**Обоснование параметров подземной геотехнологии освоения рассредоточенных рудных тел ярусного залегания**
А. М. Мажитов, С. А. Корнеев, Д. В. Доможиров, П. В. Волков
121 **Substantiation of parameters of underground geotechnology for the development of dispersed ore bodies of staged occurrence**
A. M. Mazhitov, S. A. Korneev, D. V. Domozhirov, P. V. Volkov

**Электрифицированный автотранспорт для подземных и открытых горных работ**
М. Л. Хазин
128 **Electric trucks for underground and open pit mining**
M. L. Khazin

**Обоснование параметров фрикционного привода агрегатов горно-обогатительного производства**
И. П. Тимофеев, М. С. Столярова
136 **Substantiation of parameters of friction drive units for the ore mining and dressing plant**
I. P. Timofeev, M. S. Stolyarova

## ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

## ECONOMIC SCIENCES

**Оценка воздействия на окружающую среду как инструмент государственного регулирования хозяйственной деятельности**
А. Н. Иванов, М. Н. Игнатьева, Н. Г. Пустохина
**(In English)**
143 **Environmental impact analysis as a tool for state regulation of economic activity**
A. N. Ivanov, M. N. Ignat'eva, N. G. Pustokhina
**(In English)**

**Эколого-экономическое развитие муниципальных образований Забайкальского края в контексте концепции «зеленой» экономики**
И. А. Забелина, Ю. В. Колотовкина
149 **Ecological and economic development of municipalities of the Zabaykalsky Krai in the context of "green" economy**
I. A. Zabelina, Yu. V. Kolotovkina

**Сбалансированное природопользование: подходы к оценке**
В. Г. Логинов, В. В. Балашенко
156 **Sustainable natural resource use: approaches to evaluation**
V. G. Loginov, V. V. Balashenko

**Роль институтов развития в наращивании инвестиционных ресурсов территорий**
Е. Н. Сидорова, А. В. Трынов
162 **The role of development institutions in building up investment resources of old industrial territories**
E. N. Sidorova, A. V. Trynov

## ИСТОРИЯ ГОРНОГО ДЕЛА

## HISTORY OF MINING

**Святослав Несторович Иванов (1911–2003) и святославит**
Ю. В. Ерохин, К, С. Иванов
171 **Svyatoslav Nestorovich Ivanov (1911–2003) and Svyatoslavite**
Yu. V. Erokhin, K. S. Ivanov

**Геофизический факультет и его вариации**
В. В. Филатов
178 **Geophysics department and its variations**
V. V. Filatov

# Науки о Земле
# Earth sciences

УДК 550.83 https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-1-7-17

# Basement configuration depth methods of airborne magnetic data in the eastern Gulf of Suez, Egypt

**Sergey Vladimirovich SHIMANSKIY**[1, *],
**Ahmed TARSHAN**[1, 2, **]

[1]Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia
[2]Nuclear materials Authority, Cairo, Egypt

One of the best methods used to delineate basement structures and configuration is the airborne magnetic survey data.
***The goal*** of this research is to accurately delineate the deep-seated basement configuration and structures. Production of geophysical maps after processing the data, including two-dimensional (2D) and three-dimensional (3D) magnetic susceptibility layered-earth models for high-resolution airborne RTP magnetic data over the eastern part of the Gulf of Suez, was conducted to accurately detect the shallow and deep-seated basement structures. The well data was used to correlate and control the depth of the basement during the 2D and 3D modelling.
***Results*** of the estimation of the depth to the basement showed that Analytical Signal (AS), Source Parameter Imaging (SPI) and Euler methods have very similar results. The eastern part in the three maps indicates more shallow depths that reach 300 m in some locations; on the other hand, the western part of the area indicates deeper depths to the basement, which in some places reaches 5000 m from the existing averaged ground surface. The 3D modelling showed an adequate matching between the depth to the basement in the calculated and observed data. The sedimentary section is tectonically affected by such deep-seated basement structures with a set of faults that extend from the basement upwards through the sedimentary cover. Generally, these faulted sedimentary blocks may constitute potential structural traps for the hydrocarbon accumulation.

*Keywords*: 2D and 3D magnetic susceptibility, layered-earth models, deep-sated basement structures, regional and residual RTP, eastern Gulf of Suez region.

## Introduction

The airborne magnetic tool method is one of the best methods used to illustrate the horizontal variation in magnetic properties of underlying rocks. Generally, the basement rocks represent deeper anomalies and have high magnetic fields, while the sedimentary rocks represent the shallower anomalies and have lower magnetic fields.

The oldest rocks in Egypt are basement rocks; these rocks have likely recorded all tectonic events that have affected Egypt since the beginning of the Cambrian period to the present. The aeromagnetic survey method is one of the most effective geophysical methods for mapping tectonic trends of deeply buried basement rocks. Usually, aeromagnetic mapping reflects the horizontal variation in magnetic properties of underlying rocks. In this regard sedimentary rocks, excluding iron ores and basic extrusions intruded within them, are characterised by very low magnetic susceptibility, while igneous and metamorphic rocks (the main components of basement rocks) are strongly magnetised. The more heterogeneous and deformed the basement rocks, the shaper and stronger their magnetic signatures will be on the aeromagnetic map [1].

In this research, different methods to determine the depth to the basement at the eastern part of the Gulf of Suez were applied. There are many methods that can be used to delineate the depth to the basement such as source parameter imaging (SPI), analytical signal method and Euler Method. Additionally, the role of three-dimensional (3D) modelling has become more important. The 3D modelling in geophysics is divided into two important parts: the forward and the inverse problem. In geophysics, for the forward problem, a model is given and the data is calculated, while geophysical inversion is mathematical technique used to retrieve information about sub-surface physical properties (magnetic susceptibility, density, electrical conductivity, etc.) of measured geophysical data.

The observed total magnetic intensity in the airborne magnetic survey is measured as a result of the Earth's Magnetic Field. The forward model has a unique solution in which the data is calculated depending on the model. However, when applying the inverse process the reasonable produced model depends on the measured data. The main factor that controls the observed magnetic field on the earth's surface is the susceptibility differences distribution ($\Delta k$) in the subsurface.

The main target of the inverse process is to minimize the deviation between the measured and calculated data. Usually an iterative procedure is used to reach this goal, where the data and model parameter vectors are related via a non-linear response function, which tells us how to calculate the synthetic data from the given model.

### Data acquisition

During March 1998, the Airborne Geophysics Department of the Nuclear Materials Authority (NMA) of Egypt led a high-resolution aeromagnetic survey covering 2745 km$^2$ over the eastern part of the Gulf of Suez. Data was gained along primary

*s.shimanskii@spbu.ru
http://orcid.org/0000-0001-9710-9392
** ✉ ahmed_ramadan_geo@hotmail.com
http://orcid.org/0000-0002-5403-5220

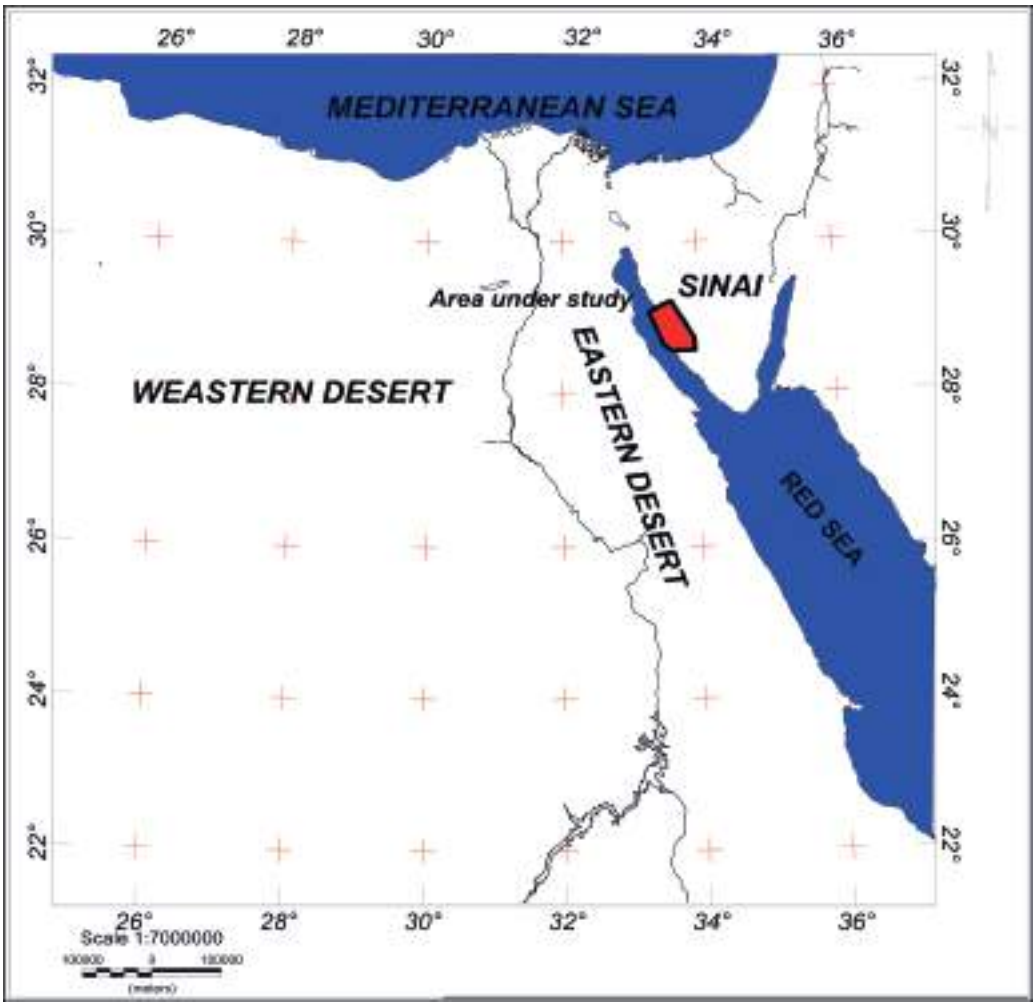



**Figure 1. The map of Egypt showing the location of the area under study.**
**Рисунок 1. Карта Египта с указанием местоположения исследуемой территории.**

(essential) lines spaced at 1000 m and along control lines spaced at 10000 m (normal to the primary lines). Nominal flying elevation was about 100 m (330 ft) above ground surface (terrain clearance). The direction of the survey was 125°–305° azimuth degrees for primary lines and 35°–215° azimuth degrees for control lines (Fig. 1).

### Geologic features

Geologically, the area is covered by a variety of rock formation from Quaternary, Miocene, Paleocene, Cretaceous and Paleozoic Eras (Fig. 2). It contains man made features such as several oil fields (Rudeis, Feiran and Belayim oil fields). The western side of the studied area is part of the Gulf of Suez. It is dominated by several mountains such as Gabal Zeit at the southern part of the area, which is formed of undeformed alkali granitic rocks, Gabal Nazzazat (formed of siliciclastic- carbonate succession) and Gabal Ekmain the central part of the area. There are some Wadis within the area such as Wadi Abu Ratamat, Wadi Abiad and Wadi Thaghada. The nearby eastern part of the Gulf of Suez is covered by Quaternary deposits (Fig. 2).

### Airborne magnetic data calibration and processing

The Figure of Merit (FOM) test, heading test and lag test were applied after the survey. The FOM test was carried out at flight height 10,000 above sea level at each survey direction. Heading test was carried out. The values of the heading used in the processing of the data are ± 10 and ± 6 for primary lines and tie lines, respectively. The lag test was applied to establish the magnitude of any timing differential within the whole survey system. The resulting parallax/lag error calculated was 0.6 seconds. The magnetometer base station was used to remove the diurnal variation twice daily before and after survey, rather than repeated flying on control lines across the traverse lines. The data was obtained from the fixed magnetometer (magnetometer base station) used in correcting the observed data by direct subtraction.

The International Geomagnetic Reference Field (IGRF) correction is done to remove the regional gradient of the Earth's Magnetic Field due to the continual changes in the direction and magnitude of the earth's main field as one goes from one place to another [3]. The magnetic field of the earth is recorded every five years as international magnetic map. Data levelling and Micro levelling applications were applied. The origin of levelling problems is that geophysical surveys collect data under constantly changing conditions that contribute to errors. The most obvious effect of such errors is an apparent level shift in neighbouring parallel survey lines, which is a phenomena commonly referred to as levelling error.

Systematic errors are measurable and can be corrected using simple mathematical formulae and systematic corrections compensate for measurable errors in the data. Systematic errors follow regular patterns and are removed mathematically by the computer [4].

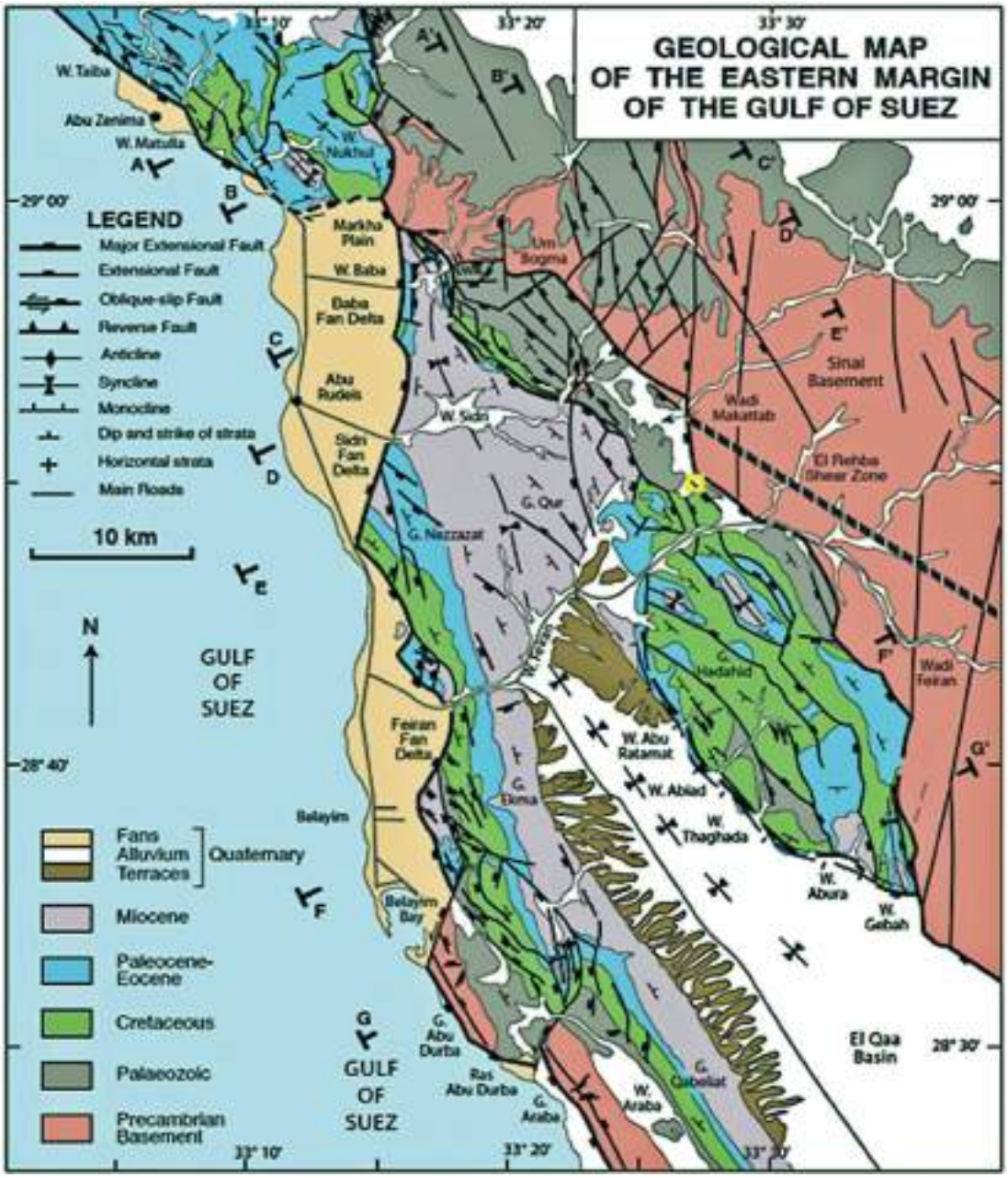



**Figure 2. Geological map of the Middle Eastern part of the Gulf of Suez, Egypt [2].**
**Рисунок 2. Геологическая карта средневосточной части Суэцкого залива, Египет [2].**

## Data treatment and qualitative/semi-qualitative analysis

Three filled-colour contour maps were created from the aerial magnetic survey data. The reduced to the pole (RTP) map (Fig. 3) is generated from a total magnetic intensity map. Because of the inclination of the earth's magnetic field, most magnetic anomalies show both positive and negative counterparts. These minimum and maximum anomalies are generally displaced from the centre of the causative body along the magnetic meridian line. This is only the case when the inclination is 90° and the magnetic anomaly lies directly over the centre of the source body. The RTP is used to remove this effect, so that the data appears as if observed at the pole where the magnetic field is vertical. The magnetic peaks, then, occur directly over the magnetised bodies, particularly in the case of absence of remnant magnetization [5]. In the opposite case, when the inclination is equal to 0°, the minimum is located directly over the magnetic body. The field reduced to the pole at a fixed point above the measurement plane in the frequency domain is given by [6]

$$L(\theta) = 1/[\sin(I_a) - i\cos(I)\cos(D+\theta)]^2, \text{ if } (I_a < I),\ I_a = I,$$

where $I$ – geomagnetic inclination, $I_a$ – inclination for amplitude correction (never less $I$); $D$ – geomagnetic declination, θ – wave number direction, $i$ – imaginary component.

Regional and residual magnetic-component maps, which are created by the Gaussian filter technique (Fig. 4, a, b), are produced. The separation processes are designed to separate broad deeper variations "i. e., regional" from sharper local variations "i. e., residual" magnetic anomalies. In other words, the magnetic map is split into two parts, the regional and the residual

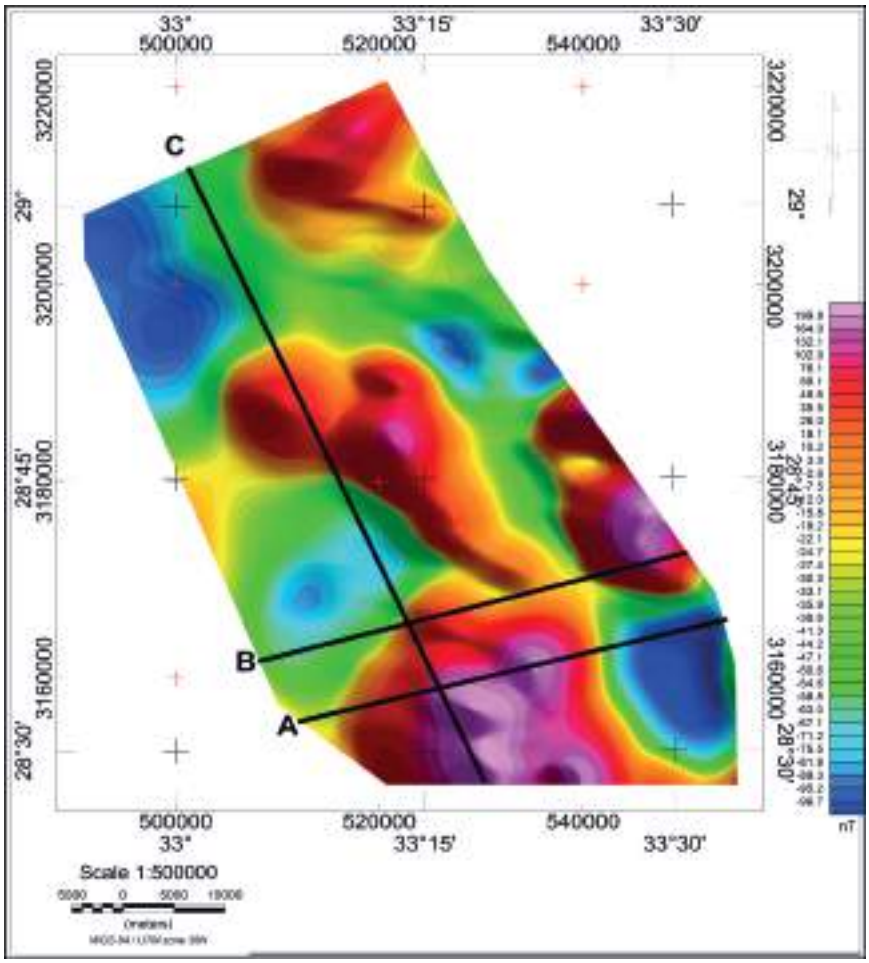



**Figure 3. Colour shaded contour map of Reduced to North Pole Total Magnetic Intensity Field showing the profiles of the two-dimensional modelling, eastern part of the Gulf of Suez, Egypt.**
**Рисунок 3. Цветная контурная карта полного вектора магнитного поля, редуцированного к Северному полюсу, показывающая профили двухмерного моделирования (восточная часть Суэцкого залива, Египет).**

magnetic-component maps. The residual map focuses map attention on weaker features, which are obscured by strong regional effects on the original map [7].

### The energy (power) spectrum

The calculated radially averaged power spectrum (Fig. 5) for the aeromagnetic RTP can be divided into three portions. The first one represents regional or deep sources components that are in the frequency range of 0.0 to 0.15 cycles per km. The second portion represents residual or shallow sources components that range in frequency from 0.15 to 0.65 cycle/km. The third portion, which frequency exceeds 0.65 cycle/km, is the noise component. The estimated mean depths of both regional and residual sources were found to be 4.5 km and 1.8 m, respectively (Fig. 4).

### Magnetic depth estimation

Magnetic data analysis was used to guide the structural configuration and composition of the basement using three advanced techniques. These methods are analytical signal (AS), source parameter imaging "SPI" and Euler method [8].These methods have proved to be effective tools for locating magnetic structures such as faults.

### A. Analytical signal (AS) technique

The analytical signal is the square root of the sum of the squares of the vertical and the two horizontal derivatives of the total magnetic field. The analytical signal approach has been successively used in the form of 3D interpretation of aeromagnetic data [9].

The analytical signal method's success results from the fact that the location and depth of magnetic sources are found with only a few assumptions about the nature of the source body, which is typically assumed as a two-dimensional (2D) magnetic source such as contact, step, horizontal cylinder and dike. The amplitude shape of the analytical signal for these geological models is a bell-shaped symmetric function located directly above the source body. The magnetic source depths, using the magnetic method, are calculated from the ratio of the total magnetic analytical signal to the vertical derivative analytical signal of the total magnetic intensity (Fig. 6, a).

### B. Source Parameter Imaging (SPI) technique

SPI is a technique based on the extension of complex analytical signals to calculate magnetic depths [8]. The interference and overlap of anomaly features is reducible due to using second-order derivatives in this method. The method is used on gridded data by first estimating the direction at each grid point. The vertical gradient is calculated in the frequency domain, and the horizontal derivatives are calculated in the direction perpendicular to the strike using the least-squares method (Fig. 6, b).

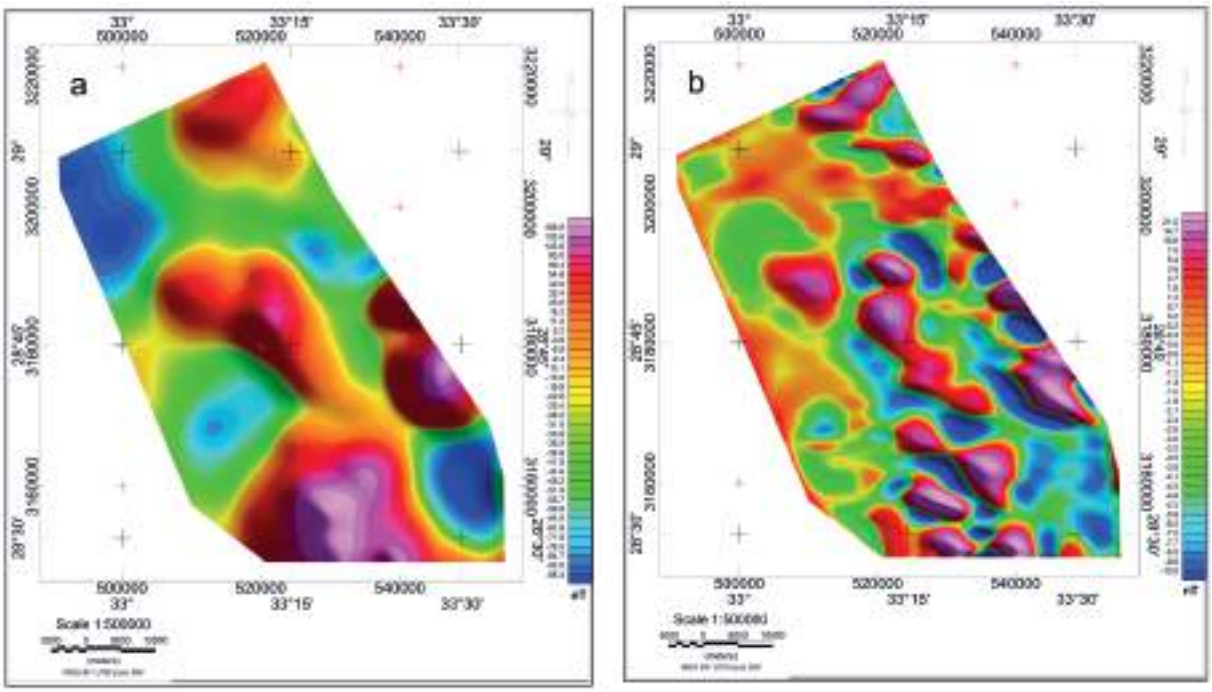



**Figure 4. Colour shaded contour map of a) the regional and b) the residual magnetic components of the RTP map eastern part of the Gulf of Suez, Egypt.**

**Рисунок 4. Цветная контурная карта а) региональной и б) остаточной магнитной компоненты, редуцированной к полюсу карты, восточной части Суэцкого залива, Египет.**

### C. Euler method

Euler deconvolution method is an advanced technique depending on both amplitude and gradients to determine the source of potential fields. At first, this method was used to interpret the 2D magnetic anomalies, developed to be used on grid-based data. Magnetic field M and its spatial derivatives satisfy Euler's equation of homogeneity (Fig. 6, c), this method was developed by Thompson [10]

$$\left(x-x_0\right)\frac{\partial M}{\partial x}+\left(y-y_0\right)\frac{\partial M}{\partial y}+\left(z-z_0\right)\frac{\partial M}{\partial z}=-NM,$$

where $\frac{\partial M}{\partial x}$, $\frac{\partial M}{\partial y}$ and $\frac{\partial M}{\partial z}$ represent first order derivatives of the magnetic field along the $x$, $y$ and $z$ directions, respectively; $N$ is the structural index and is related to the geometry of the magnetic source. For example, $N = 0$ for magnetic contact, $N = 1$ for thin dike, $N = 2$ for pipe and $N = 3$ [11].

The first look at the three maps shows that AS, SPI and Euler methods have very similar results (Fig. 6, a–c).The eastern part in the three maps indicates more shallow depths to the basement that reach 300 m in some locations. On the other hand, the western part of the area indicates deeper depths to the basement, which in some locations reaches 5000 m. The central southern part of the area in the three maps refers to the existence of the basement at very low depths, where in some places the depth to the basement in the area is outcropped. On the other hand, the depths become greater moving towards the east, which may be evidence of the existence of a basin. The result of the depths to the basement of the analytical signal method ranges from115 to 5000 m and the depths to the basement of the SPI method ranges from 384 to 5134 m, while the depths obtained from Euler method vary from 414 to 5177 m. The results of the three methods are very similar to each other.

### Two-dimensional (2D) data inversion

2D inverted susceptibility layered-earth model was applied along three profiles within the area under study as shown in (Fig. 3).

**Profile A** (Fig. 7), extends more than 42 km long in the SW-NE direction passing through Well Belayim Bay-3 [12], which controls the geometry and physical parameters of the basement blocks. The depth at this well showed great compatibility between real and calculated depth, which is equal to 3530 m.

This profile shows a good fit between the observed and calculated magnetic curves with root mean square (RMS) equal 2.582%. The type of basement rock from different wells within the area is granite. The magnetic susceptibility used at this profile is 0.0045 SI. The moderate thick sedimentary layer with varying thickness overlaying the basement rocks has an average susceptibility value. The depth to the basement in the middle of the profile is shallower than the depth at the edges, where the depth at the eastern part is more than 6000 m, which matches with AS and SPI maps (Fig. 6, a, b). Structurally, the profile shows that the basement is tilted by a number of normal faults where the main trend of the extension stress pattern of the gulf is in a NE-SW direction.

**Profile B**, extends more than 42 km, passing through Belayim 112-64 well [12], which controls the geometry and physical parameters of the basement blocks. The depth at this well showed great compatibility between real and calculated depth, which is equal to 2285 m. This profile shows an excellent fit between the observed and calculated magnetic curves with RMS equal to

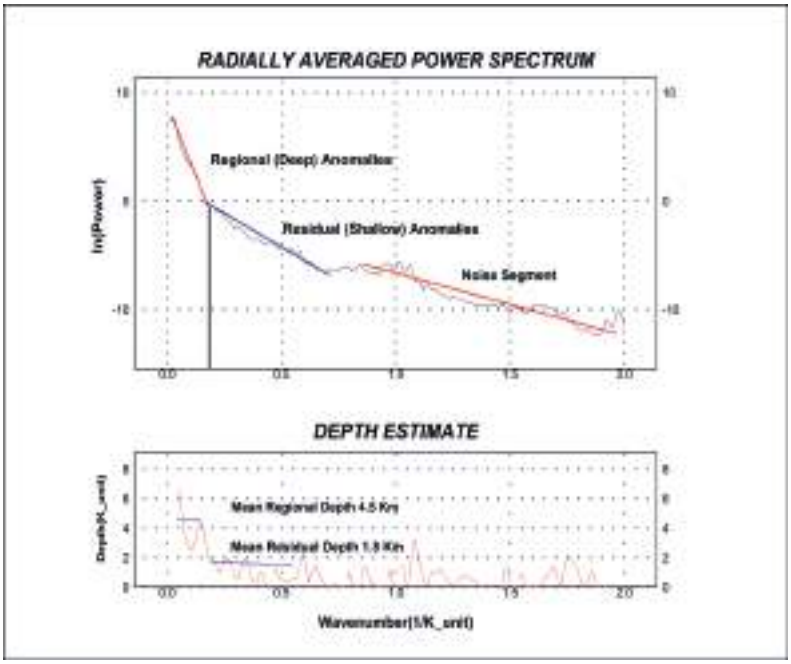



**Figure 5. Power spectrum of magnetic data showing the corresponding averaging depths, eastern part of the Gulf of Suez, Egypt.**
**Рисунок 5. Спектр мощности магнитных данных, иллюстрирующий соответствующие усредняющие глубины (восточная часть Суэцкого залива, Египет).**

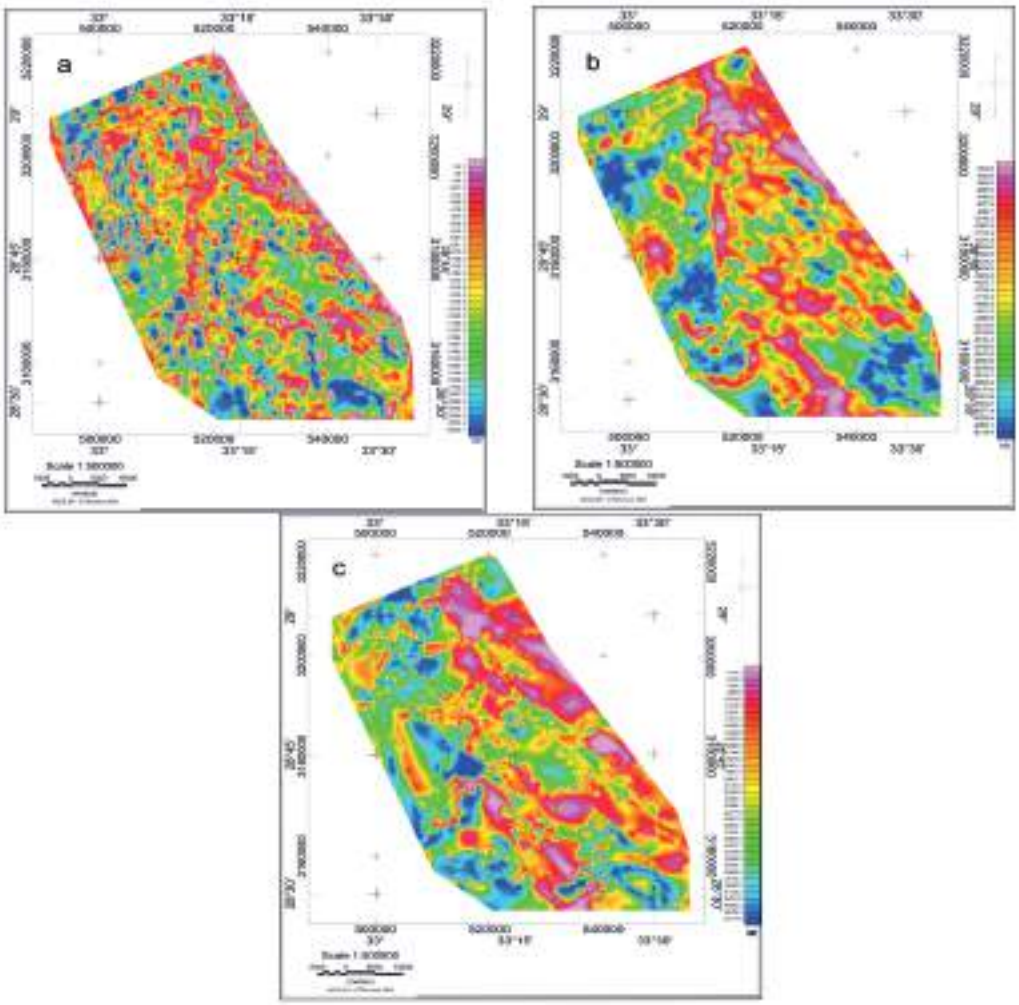



**Figure 6. Filled colour contour map of depth to magnetic bodies as calculated using a) analytical signal method, b) source parameter imaging (SPI) and c) Euler Method, eastern part of the Gulf of Suez, Egypt.**
**Рисунок 7. Закрашенная контурная карта глубин до магнитных тел согласно вычислениям с использованием а) метода аналитического сигнала, б) изображения источникового параметра и в) метода Эйлера (восточная часть Суэцкого залива, Египет).**

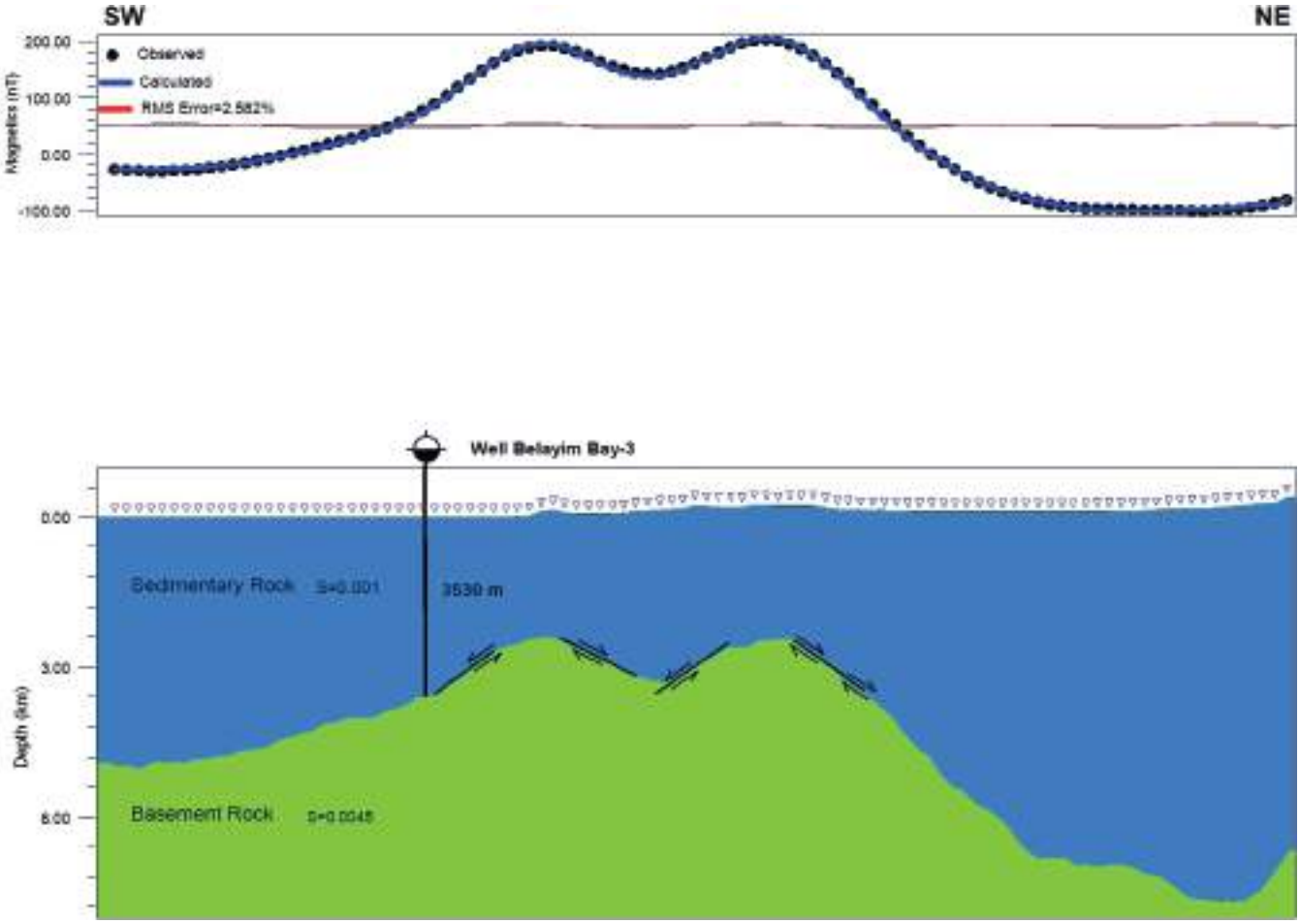



**Figure 7. 2D inverted susceptibility layered-earth model and calculated geomagnetic response of the profile A, eastern part of the Gulf of Suez, Egypt.**
**Рисунок 7. Двухмерная модель магнитной восприимчивости, полученная решением обратной задачи для слоистой земли, и вычисленный геомагнитный отклик профиля А (восточная часть Суэцкого залива, Египет).**

2.525%. The magnetic model proved the presence of a moderate sedimentary layer in the north western part of the profile, which has an average susceptibility value of 0.001 SI that decreases to the north east because the depth to the basement decreases close to the Precambrian outcropped basement of Sinai. Structurally, the profile shows that the basement is tilted by a number normal faults formed due to tension forces in the NE and SW direction.

**Profile C** (Fig. 8), extends more than 68 km long in the NW-SE direction. This profile shows an excellent fit between the observed and calculated magnetic curves with RMS equal to 3.233%. This profile passes through three wells that are used to control the depth to the basement Abu Zeneima 11-1s1, Feiran N.-1 and Belayim 112-64 [12]. The depth at this well showed great compatibility between real and calculated depth, which is equal to 3830, 3825, and 2285 m, respectively. Structurally, the profile shows that the basement is tilted by a number of normal faults. The depth to the basement becomes shallower at the south western part than the north eastern part. This is evidence for existence of a basin in the northern part of the area.

### 3D magnetic modelling interpretation

Using GM–SYS–3D inversion code, the presumed sedimentary section–basement complex magnetic susceptibility contrast $\Delta k$ for several inversion trials was gradually set between 0.035 and 0.08 SI during the inversion run. The inverted basement relief images, corresponding to the used susceptibility contrasts, were consistently inspected. The effective susceptibility contrast was found close to the susceptibility contrast of 0.0628 SI (5000 micro cgs unit), and correspondingly its calculated basement relief image (Fig. 9). The overall calculated 3D response fit the observed geomagnetic data better than ±50.0 nT. Other model parameters are set to be constant for all trails (convergence limit: 10 nT, Z0: 0 m and regional offset: 0.0), where Z0 is the nominal top of basement surface.

The depth to the basement estimates reliably varied between 500 and 4700 m. The depth to the basement correlated with the available drilled stratigraphic-control wells within the area under study. These wells are RB-A5 [13], Abu Zeneima 11-1S1 and Feiran N-1 [12], BM 113-27 [14], Ekma-1 and Abu-Durba 115-1 [15]. The encountered basement relief at the study area was shown up with three major basinal structures. These basins are located at the north western, central western and south eastern part of the area.

The available wells were sufficient to some extent to constrain the inversion process but if more wells are available they could help in constraining the inversion and minimising the misfit value. At the unconstrained location, the misfit value is higher and error could be because of the variation in magnetic susceptibility of the basement. The depths to the basement at the available wells in the calculated basement relief image showed a good matching with the actual values of the depths at these wells. Table shows the actual and observed value of depth to basement at each well.

**Calculated and actual depth at the available wells within the area under study.**
**Расчетная и фактическая глубина на имеющихся скважинах в пределах исследуемой территории.**

| Well Number | Well Name | Calculated Depth (m) | Actual Depth (m) |
|---|---|---|---|
| 1 | RB-A5 | 3765 | 3761 |
| 2 | Abu Zeneima 11-1s1 | 3850 | 3830 |
| 3 | Feiran N-1 | 3830 | 3825 |
| 4 | BM 113-27 | 4189 | 4181 |
| 5 | Ekma-1 | 2174 | 2170 |
| 6 | Abu-Durba 115-1 | 2091 | 2090 |

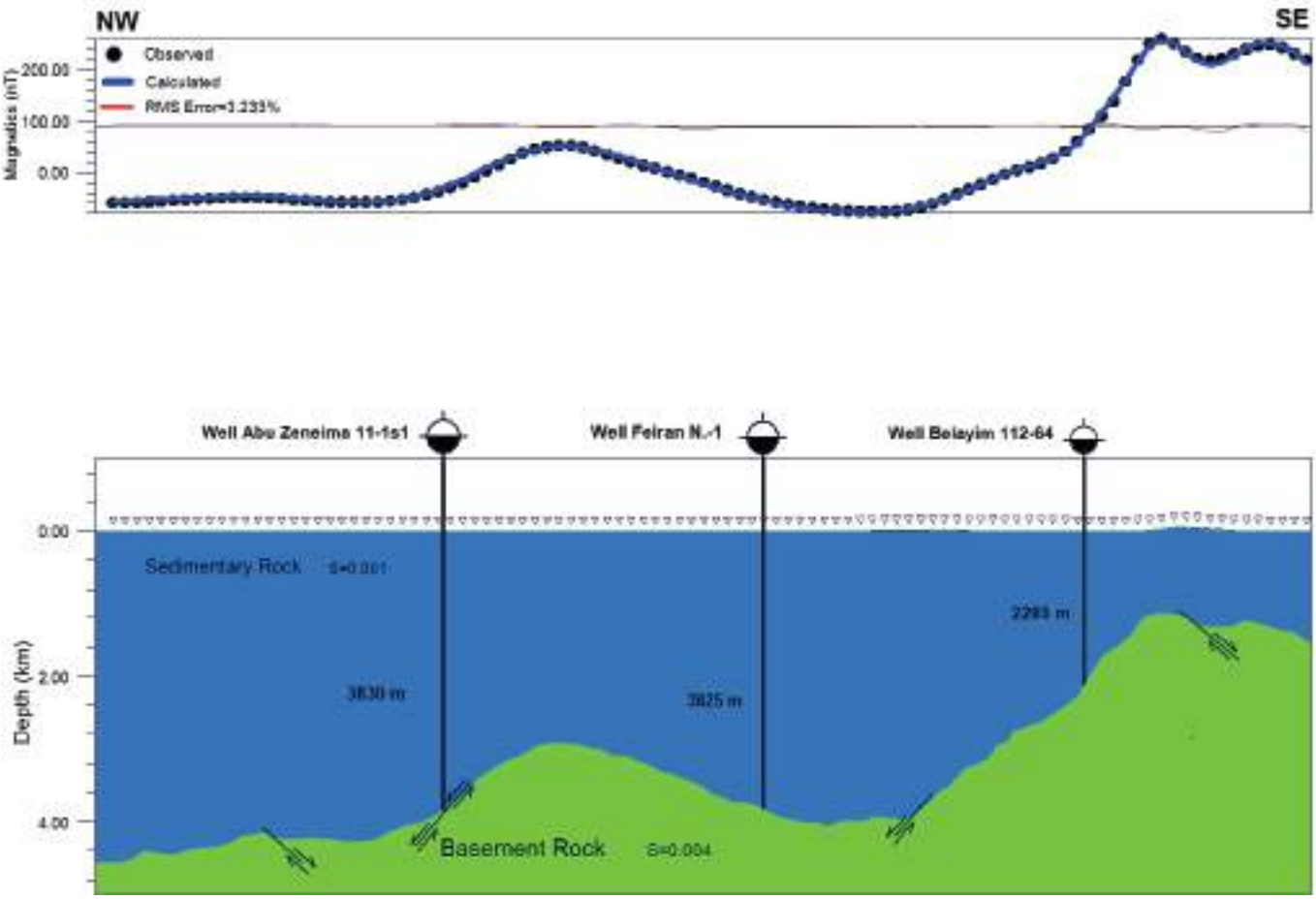



**Figure 8. 2D inverted susceptibility layered-earth model and calculated geomagnetic response of the profile C, eastern part of the Gulf of Suez, Egypt.**
**Рисунок 8. Двухмерная модель магнитной восприимчивости, полученная решением обратной задачи для слоистой земли, и вычисленный геомагнитный отклик профиля С (восточная часть Суэцкого залива, Египет).**

## Conclusion

High-resolution airborne geomagnetic anomaly data sets were consistently and extensively acquired, processed and multi-dimensionally inverted over the eastern part of the Gulf of Suez. The starting models for all inversion trails were initially built-up using a priori information gained from the progressive standard qualitative and semi-qualitative interpretations. Three methods (AS, SPI and Euler) were applied to determine the depth to the basement. The results of the three methods were close to each other. The three maps showed two major zones in the area. The first zone in the western part of the area is characterised by high depth to basement. The second zone in the eastern part of the area has a depth to basement lower than the eastern part. The depth to the basement varies from 150 m to 5200 m. 2D inverted susceptibility layered-earth model was applied along three profiles within the area. The well data controlled the geometry and physical parameters of the basement blocks. Using GM–SYS–3D inversion code, 3D modelling was applied. Several inversion trials were gradually set with different susceptibility ($\Delta k$) between 0.035 and 0.08 SI during the inversion run. The effective susceptibility contrast was found close to the susceptibility contrast of 0.0628 SI. The depth to the basement correlated with the available drilled stratigraphic-control wells within the area under study. The depth to the basement in the area reliably varied between 10 and 4800 m from the existing averaged ground surface. The encountered basement relief at the study area was shown up with three major basinal structures. These basins are located at the north western, central western and south eastern parts of the area. The results suggest that the sedimentary cover is tectonically affected by deep-seated basement structures with a set of tectonic faults extending from the basement upwards through the

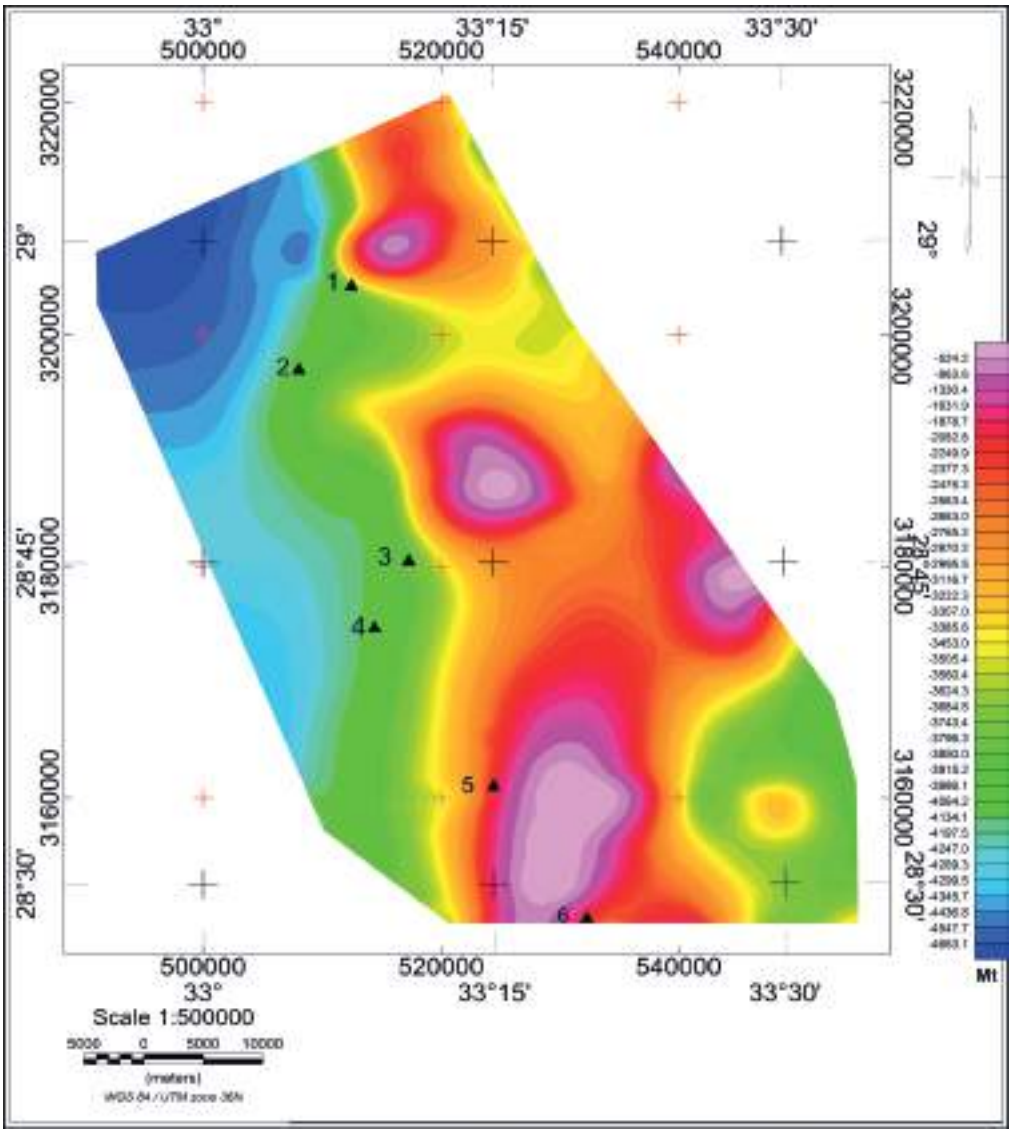



**Figure 9. Basement relief contour map after performing the 3D layered-earth inversion of the subsurface magnetic susceptibility distributions and location of wells illustrated with numbers on the map, eastern part of the Gulf of Suez, Egypt.**
**Рисунок 9. Контурная карта рельефа фундамента после выполнения инверсии трёхмерной слоистой земли для распределения подповерхностной магнитной восприимчивости и расположение скважин, показанных цифрами на карте (восточная часть Суэцкого залива, Египет).**

sedimentary cover. These faulted sedimentary blocks may constitute potential structural traps for the hydrocarbon accumulation; therefore further geophysical investigation could be needed.

## REFERENCES

1. Meshref W. M. 1990, Tectonic framework of Egypt. In: R. Said (Ed.). The Geology of Egypt. Rotterdam, Netherlands, Balkema Publishers, pp. 113–156.
2. McClay K. R., Nicols G. J., Khalil S. M., Darwish M., Bosworth, W. 1998, Extensional tectonics and sedimentation, eastern Gulf of Suez, Egypt. In: B. H. Purser and D. W. I. Bosence (Eds.). Sedimentation and Tectonics of Rift Basins: Red Sea–Gulf of Aden. London, Chapman and Hall, pp. 223–238.
3. Dobrin M. B. 1976, Introduction to geophysical prospecting. N. Y., USA, McGraw-Hill Book Co. 630 p.
4. 2006, Geosoft. Montaj Geophysics Levelling System, Processing and enhancement geophysical data expansion for Oasis montaj. Toronto, Geosoft Inc. Vol. 3.
5. Kearey P., Michael B. 1994, An introduction to geophysical exploration. Second Edition. London, Great Britain, Blackwell Scientific Publication, p. 245.
6. Blakely R. J. 1995, Potential theory in gravity and magnetic applications. Cambridge, England, Cambridge University Press. 461 p.
7. Ali M. M. 2009, Acquisition, processing and interpretation of airborne magnetic and gamma-ray spectrometry survey data of Elkharga area, Central Western Desert Egypt, M. Sc. Thesis. Al Minufiya, Egypt, Menoufiya University, pp. 30–39.
8. Thurston J. B., Smith R. S. 1997, Automatic conversion of magnetic data to depth, dip, and susceptibility contrast using the SPI(TM) method. *Geophysics*. Vol. 62, pp. 807–813. https://doi.org/10.1190/1.1444190
9. Roest W. E., Verhoef J., Pilkington M. 1992, Magnetic interpretation using 3D analytic signal. *Geophysics*, vol. 57, pp. 116–125. https://doi.org/10.1190/1.1443174
10. Thompson D. T. 1982, EULDPH: A new technique for making computer-assisted depth estimates from magnetic data. *Geophysics*, vol. 47, pp. 31–37. https://doi.org/10.1190/1.1441278

11. Reid A. B., Allsop J. M., Granser H., Millet A. J., Somerton I. W. 1990, Magnetic interpretation. *Geophysics*, vol. 55, pp. 80–91. https://doi.org/10.1190/1.1442774
12. Rabeh T., Khalil A. 2014, Characterization of fault structures in southern Sinai Peninsula and Gulf of Suez region using geophysical data. *Environmental Earth Sciences*, vol. 73, pp. 1925–1937. https://doi.org/10.1007/s12665-014-3541-x
13. Attia H. M., Ahmed M. A., Korrat I. M. 2015, Thermal maturation simulation and hydrocarbon generation of the Turonian Wata formation in Ras Budran oil field, Gulf of Suez, Egypt. *Journal Environmental Sciences*, vol. 44, pp. 57–92.
14. Afife M. M., Al-Atta M. A., Ahmed M. A., Issa G. I. 2016, Thermal maturity and hydrocarbon generation of the Dawi Formation, Belayim Marine Oil Field, Gulf Of Suez, Egypt: A 1D basin modeling case study. *Arabian Journal of Geosciences*, vol. 9, pp. 1–31. https://doi.org/10.1007/s12517-016-2320-2
15. Azab A. A., El-khadragy A. A. 2013, 2.5-D gravity/magnetic model studies in Sahl El Qaa Area, Southwestern Sinai, Egypt. *Pure and Applied Geophysics*, vol. 170, pp. 2207–2229. https://doi.org/10.1007/s00024-013-0650-5

*The article was received on December 12, 2018*

УДК 550.83 https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-1-7-17

# Методы изучения глубинного строения фундамента на основе аэромагнитных данных в восточной части Суэцкого залива, Египет

**Сергей Владимирович ШИМАНСКИЙ**[1, *],
**Ахмед ТАРШАН**[1, 2, **]

[1]Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия
[2]Управление ядерных материалов, Каир, Египет

Одним из лучших методов определения структур и строения фундамента является аэромагнитная разведка.
***Целью*** данного исследования является точное определение глубинного строения фундамента и структур. Создание геофизических карт после обработки данных (включая двухмерные (2D) и трехмерные (3D) модели слоистой среды с магнитной восприимчивостью для RTP-магнитных данных высокого разрешения над восточной частью Суэцкого залива) проводилось с целью более точного определения неглубоких и глубоко расположенных структур фундамента. Для корреляции и контроля глубины фундамента во время 2D и 3D-моделирования использовались скважинные данные.
***Результаты*** оценки глубины до фундамента показали, что метод налитического сигнала (AS), метод изображения источникового параметра (SPI) и метод Эйлера дают очень похожие результаты. Восточная часть на трех картах указывает на небольшие глубины, которые в некоторых местах достигают 300 м; с другой стороны, западная часть области указывает на большие глубины до фундамента, которые в других местах достигают 5000 м от существующего среднего показателя надземной поверхности. В расчетных и наблюдаемых данных трехмерное моделирование показало приемлемое соответствие от глубины до фундамента. На разрез осадочного чехла тектонически воздействуют такие глубоко расположенные структуры фундамента с множеством разломов, которые простираются от фундамента вверх через осадочный чехол. В целом эти нарушенные осадочные блоки могут формировать потенциальные структурные ловушки и накапливать углеводороды.

*Ключевые слова:* 2D и 3D магнитная восприимчивость, модели слоистой среды, глубинные структуры фундамента, региональные и аномальные, редуцированные к полюсу данные (RTP), восточная часть Суэцкого залива.

*Статья поступила в редакцию 12 декабря 2018 г.*

*s.shimanskii@spbu.ru
http://orcid.org/0000-0001-9710-9392
** ahmed_ramadan_geo@hotmail.com
http://orcid.org/0000-0002-5403-5220

УДК 551.222: 552.086: 553.41 (234.851)
https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-1-18-27

# Petrochemical features of the dike complex of the Vorontsovskoye gold-ore deposit (Northern Urals)

**Oksana Borisovna AZOVSKOVA***,
**Mikhail Yuryevich ROVNUSHKIN****,
**Elena Industrovna SOROKA*****

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

***Relevance of the work.*** The Vorontsovskoye deposit has some peculiarities of the Carlin-type deposit and is one of the largest gold fields in the Urals. However, nowadays, it is almost worked out; similar objects in the region have not been identified. The dike complex of the stockwork type was not previously studied at the deposit. The undertaken research can help clarify both the model of formation of ore mineralization and the predictive model.
***Purpose of the work.*** Study of the composition and petrochemical features of the dike complex of the Vorontsovskoye deposit as one of the possible factors for the formation of gold-ore mineralization.
***Methods of research.*** The measurements of the occurrence of dikes within the current open-pit with the results on the azimuth grid were carried out. A silicate dike sample assay was performed, and available past data was also used. The lithologic study of dikes was accompanied by the study of samples using the JSM-6390LV scanning electron microscope (JEOL) with the IncaEnergy-450 energy-dispersive spectrometer and the CamecaSX100 electron probe microanalyzer.
***Results of the work.*** At the first stage of the research, the structural position of dikes was specified; results of lithologic and petrochemical studies and data obtained by microanalyzers were summarized. A significant prevalence of the main dikes with various compositions from picrobasalt to gabbrodiorite (andesibasalt) has been identified. A group of dikes with increased and high alkalinity (including lamprophyres) with compositions from moderately alkaline and alkaline picrobasalt to monzodiorite (trachyandesibasalt) has been identified as well. Occurrences of kalifeldspath metasomatism with the mineral association of chlorite-quartz- potassium feldspar-pyrite (±galena) were recorded in dikes of complete line. Earlier, areas of kalifeldsparization were observed in tuff siltstones.
**Conclusions**. Availability of dike stockwork can be considered as a positive structural factor in the formation of the deposit. Its role as a magmatic factor is unclear; however, it can be assumed that occurrences of kalifeldsparization are allied to dykes of increased alkalinity.

*Keywords:* Northern Urals, Vorontsovskoye gold-ore deposit, dikes, petrochemistry, kalifeldspath metasomatism, Carlin-type.

## Introduction

The Vorontsovskoye deposit is located near Krasnoturyinsk in the north of the Sverdlovsk region. It is one of the most significant gold-ore sites in the Urals. Productive gold-sulphide mineralization has Au–As–Hg–Tl–Sb trend and can be associated with the "Carlin-type" for a number of characteristics [1, 2]. At the same time, there are some signs of polygenic and polychronic formation of the deposit [1–4 et al.].

Regionally, the Vorontsovskoye deposit is located in the eastern part of the Tagil megazone within the Auerbah volcano-plutonic complex; it coincides with the Turinsko-Auerbahovskiy ore district of the Krasnoturyinsk ore zone. It is located 1.2 km west of the multi-phase Auerbah massif of gabbro-diorite-granite formation. Intrusions of the Auerbah complex, which form the massif and its associated intrusive bodies, date back to the early Devonian.

Gold mineralization is localized in the volcanogenic-sedimentary formations of the Krasnoturyinskaya suite ($D_1kr$), which form the wing of a slightly pitching monoclinal structure within the volcano-tectonic depression (graben-synclinal fold). Ore-bearing formations are carbonate (brecciated limestone, carbonate breccia) and igneous-sedimentary (tuff siltstones, tuffaceous sandstones, tuffites) formations of the Lower Devonian. They are intruded with numerous dikes of basic and medium composition, which actually form a complex ore fold within the deposit (Fig. 1).

According to the geological works of various stages of the Auerbah ore cluster, to which the Vorontsovskoye deposit associated with, it is characterized by a large variety of dikes: dolerites and gabbro-dolerites, pyroxene-plagioclase, plagioclase and amphibole-plagioclase porphyrites, diorite- and quartzdiorite porphyry, lamprophyres of spessartite type, odonite, and kersantite. It should be noted that in most cases their determination is based only on petrographic research data. The dikes of the Vorontsovskoye deposit were slightly studied previously [3, 5], but the systemic work was not carried out. Their mineragenic type and a possible role in the formation of gold mineralization remains debated. This determines the relevance of the research, the first results of which are presented in this paper.

## Objects and research methods, results of the work

During field works in 2017, more than 30 dikes were tested within the existing open-cut mining; structural measurements were carried out.

According to the results of measurements of dip azimuth (using historical measures), a graph was constructed (Fig. 2). It shows that there is a system discrete distribution of the poles in the Vorontsovskoye deposit. The systems of dikes of the north-northeast (340°–62°), south-southeast (90°–190°) and western (235°–292°) dips are distinguished. Dip angles more than 60° are characteristic for all systems. The first two systems with similar dip azimuth values are also noted in the work of I. V. Vikentyev [4].

* ✉ oazovskova@yandex.ru
http://orcid.org/0000-0003-4251-7414
**rovn@list.ru
https://orcid.org/0000-0003-1759-2818
*** soroka@igg.uran.ru
http://orcid.org/0000-0003-1360-6274

**Figure 1. Plain view of the dike ore fold in the northern part of the Severny open-pit of the Vorontsovskoye deposit.**
**Рисунок 1. Общий вид дайкового штокверка в северной части Северного карьера Воронцовского месторождения.**

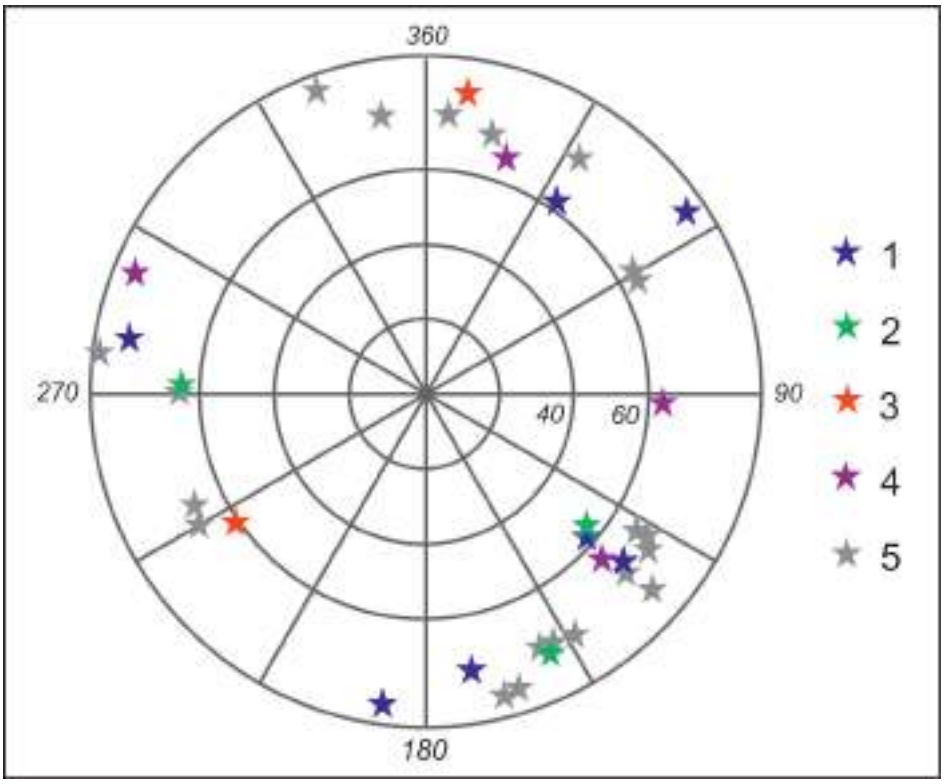



**Figure 2. Graph of the dip and strike of dikes of the Vorontsovskoye deposit in the azimuth grid.** 1 – dikes of basic composition (normal alkaline condition); 2 – dikes of medium composition (normal alkaline condition); 3 – dikes of increased alkaline condition; 4 – "neighboring composition" dikes (moderately alkaline / normal); 5 – no available data for chemical composition (according to TAS-diagram, Fig. 3).
**Рисунок 2. Диаграмма распределения элементов залегания даек Воронцовского месторождения на азимутальной сетке.** 1 – дайки основного состава; 2 – дайки среднего состава; 3 – дайки повышенной щелочности; 4 – дайки «пограничного состава» (умеренно-щелочные/нормальные); 5 – нет данных по химическому составу. По TAS-диаграмме, рис. 2.

There are no obvious patterns in the distribution of dikes belonging to different groups by chemical composition, which may be due to a lack of data.

Data on the chemical composition of dikes are given in Table 1 (the analyses were performed in the laboratory of FHMI IGG of RAS, analyst is N. P. Gorbunov). Petrographic studies showed that all dikes were altered to some extent by the imposed metamorphic and metasomatic processes. The following Table 1 excludes full metasomatites, intensely sulfidized differences and analysis with values of the indicator "P.p.p." ≥ 7.

**Table 1. The chemical composition of dikes of the Vorontsovskoye deposit.**
**Таблица 1. Химический состав даек Воронцовского месторождения.**

| Sl. No. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *Sample, No.* | *4/17* | *6/17* | *7/17* | *10/17* | *11/17* | *14/17* | *21-1/17* | *21-2/17* | *25/17* | |
| $SiO_2$ | 50.31 | 46.88 | 50.84 | 54.53 | 49.63 | 53.60 | 50.74 | 51.50 | 49.45 | |
| $TiO_2$ | 0.74 | 0.75 | 0.99 | 0.64 | 0.61 | 0.66 | 0.54 | 0.64 | 0.67 | |
| $Al_2O_3$ | 16.09 | 16.44 | 16.07 | 16.06 | 15.30 | 18.50 | 18.52 | 18.41 | 18.82 | |
| $Fe_2O_3$ | 4.33 | 7.18 | 5.33 | 4.77 | 5.30 | 3.88 | 3.72 | 5.45 | 3.43 | |
| FeO | 6.8 | 5.6 | 5.3 | 4.3 | 6.0 | 4.9 | 3.6 | 2.8 | 3.9 | |
| MnO | 0.13 | 0.20 | 0.16 | 0.14 | 0.32 | 0.16 | 0.20 | 0.25 | 0.36 | |
| MgO | 6.62 | 7.35 | 6.08 | 4.99 | 6.08 | 2.86 | 4.25 | 3.74 | 3.92 | |
| CaO | 7.71 | 6.54 | 5.57 | 6.89 | 7.69 | 9.40 | 10.16 | 9.78 | 10.59 | |
| $Na_2O$ | 2.25 | 2.95 | 3.11 | 2.47 | 2.76 | 2.72 | 3.05 | 3.87 | 2.87 | |
| $K_2O$ | 0.91 | 0.82 | 0.55 | 1.94 | 0.90 | 1.53 | 1.37 | 1.25 | 2.24 | |
| $P_2O_5$ | 0.24 | 0.15 | 0.12 | 0.21 | 0.15 | 0.16 | 0.19 | 0.21 | 0.26 | |
| V | 0.026 | 0.032 | 0.023 | 0.020 | 0.024 | 0.020 | 0.014 | 0.016 | 0.020 | |
| Cr | 0.008 | 0.005 | 0.005 | 0.010 | 0.006 | 0.012 | 0.003 | 0.009 | 0.007 | |
| Percentage of other impurities | 3.6 | 4.8 | 5.6 | 2.8 | 5.0 | 1.3 | 3.4 | 2.1 | 3.2 | |
| Amount | 99.75 | 99.70 | 99.74 | 99.76 | 99.76 | 99.69 | 99.75 | 100.02 | 99.73 | |
| S | 2.10 | 1.80 | n/a | n/a | 0.02 | 0.07 | 1.08 | 0.46 | 0.34 | |
| **Sl. No.** | **10** | **11** | **12** | **13** | **14** | **15** | **16** | **17** | **18** | **19** |
| *Sample, No.* | *26/17* | *26-1/17* | *28/17* | *29-2/17* | *29-3/17* | *30/17* | *31/17* | *34-1/17* | *34-2/17* | *35/17* |
| $SiO_2$ | 42.71 | 41.50 | 52.69 | 45.15 | 51.09 | 49.48 | 47.51 | 54.54 | 50.80 | 50.64 |
| $TiO_2$ | 0.68 | 0.60 | 0.58 | 0.57 | 0.64 | 0.72 | 0.91 | 0.59 | 0.84 | 0.45 |
| $Al_2O_3$ | 21.47 | 19.48 | 16.29 | 15.57 | 18.82 | 15.02 | 15.31 | 15.12 | 15.85 | 18.19 |
| $Fe_2O_3$ | 3.60 | 8.05 | 3.76 | 5.76 | 6.07 | 7.03 | 6.31 | 4.19 | 6.06 | 6.51 |
| FeO | 1.8 | 1.4 | 5.7 | 4.6 | 4.2 | 1.4 | 3.9 | 5.3 | 1.0 | 3.1 |
| MnO | 1.06 | 0.63 | 0.14 | 0.19 | 0.15 | 0.12 | 0.17 | 0.15 | 0.09 | 0.17 |
| MgO | 4.82 | 3.57 | 6.32 | 10.78 | 3.42 | 9.22 | 4.48 | 4.40 | 7.43 | 3.38 |
| CaO | 16.81 | 16.53 | 7.88 | 9.63 | 8.09 | 9.44 | 11.43 | 7.71 | 7.75 | 9.69 |
| $Na_2O$ | 1.12 | 1.68 | 2.28 | 1.80 | 3.25 | 2.52 | 2.95 | 3.03 | 2.58 | 2.30 |
| $K_2O$ | 2.06 | 0.77 | 1.34 | 0.39 | 0.98 | 0.16 | 0.67 | 0.99 | 2.29 | 0.80 |
| $P_2O_5$ | 0.24 | 0.22 | 0.13 | 0.06 | 0.25 | 0.16 | 0.14 | 0.18 | 0.40 | 0.16 |
| V | 0.017 | 0.014 | 0.021 | 0.022 | 0.019 | 0.014 | 0.020 | 0.021 | 0.016 | 0.011 |
| Cr | 0.006 | 0.005 | 0.008 | 0.042 | 0.006 | 0.039 | 0.007 | 0.010 | 0.016 | 0.005 |
| Percentage of other impurities | 3.6 | 5.5 | 2.5 | 5.3 | 2.7 | 4.7 | 6.1 | 3.3 | 4.9 | 4.4 |
| Amount | 99.98 | 99.96 | 99.61 | 99.85 | 99.67 | 100.03 | 99.95 | 99.53 | 100.03 | 99.82 |
| S | 0.83 | 4.54 | N/a | N/a | N/a | N/a | N/a | 0.05 | N/a | N/a |
| **Sl. No.** | **20** | **21** | **22** | **23** | **24** | **25** | **26** | **27** | **28** | **29** |
| *Sample, No.* | *36/17* | *905* | *909* | *913* | *926* | *933* | *934* | *1590* | *2 [5]* | *3 [5]* |
| $SiO_2$ | 46.65 | 45.95 | 48.05 | 53.87 | 41.0 | 46.04 | 49.2 | 52.55 | 49.69 | 52.24 |
| $TiO_2$ | 0.70 | 0.77 | 0.58 | 0.65 | 0.75 | 0.72 | 0.56 | 1.19 | 0.52 | 0.83 |
| $Al_2O_3$ | 16.99 | 17.58 | 15.47 | 18.55 | 20.47 | 12.54 | 14.49 | 12.08 | 17.88 | 18.67 |
| $Fe_2O_3$ | 8.77 | 5.81 | 3.06 | 1.96 | 2.15 | 6.13 | 3.92 | 3.44 | 3.3 | 2.31 |
| FeO | 5.2 | 5.0 | 8.55 | 4.6 | 6.6 | 4.3 | 5.2 | 2.8 | 5.34 | 5.73 |
| MnO | 0.20 | 0.13 | 0.14 | 0.22 | 0.44 | 0.16 | 0.13 | 0.12 | 0.19 | 0.20 |
| MgO | 6.87 | 2.85 | 5.69 | 3.15 | 4.72 | 13.02 | 6.3 | 8.34 | 7.22 | 4.22 |
| CaO | 9.22 | 7.1 | 7.39 | 9.52 | 9.48 | 8.17 | 8.22 | 6.7 | 9.55 | 9.75 |
| $Na_2O$ | 2.11 | 3.55 | 3.2 | 2.95 | 2.45 | 2.1 | 2.55 | 2.4 | 2.42 | 2.62 |
| $K_2O$ | 0.68 | 1.59 | 1.57 | 2.2 | 3.12 | 0.66 | 1.52 | 5.0 | 0.98 | 0.96 |
| $P_2O5$ | 0.10 | 0.24 | 0.15 | 0.18 | 0.22 | 0.15 | 0.15 | 0.84 | 0.10 | 0.15 |
| V | 0.036 | – | – | – | – | – | – | – | – | – |
| Cr | 0.008 | – | – | – | – | – | – | – | – | – |
| Percentage of other impurities | 2.2 | 6.6 | 4.2 | 1.6 | 6.4 | 5.8 | 5.0 | 4.3 | – | 1.9 |
| Amount | 99.98 | 97.19 | 98.00 | 99.49 | 97.75 | 99.75 | 97.21 | 99.78 | 97.19 | 99.55 |
| S | 0.03 | 0.04 | 1.4 | 0.16 | 2.2 | 0.22 | 2.37 | 0.16 | trace | N/a |

Note: No. 1–20 samples of 2017, No. 21–27 samples of 2009.

In the classification TAS-diagram (Fig. 3), the dikes of the Vorontsovskoye deposit fall mainly in the area of the main rocks, and only some of them – in the area of the middle rocks. It is noteworthy that there are not only quartz diorites among the dikes but also diorites typical of the area as a whole. In addition, the presence of two trends – normal alkalinity condition and hyperalkalinity – is clearly visible, and in the latter, there are dikes corresponding in composition to ultrabasic formations – picrobasalts.

According to the petrographic characteristics, several main types of dikes are distinguished (the corresponding numbers are given in parentheses for Table 1):

1. Porphyric pyroxene-plagioclase dikes (from essentially pyroxene to essentially plagioclase ones) of basalt, less often andesibasalt composition (Nos. 1, 2, 3, 5, 7, 8, 13, 19, 20).
2. Dolerites, incl. porphyritic ones (Nos. 4, 28).
3. Porphyritic amphibole-plagioclase dikes (±pyroxene) of predominantly andesitic composition (6, 16, 23, 29).
4. Gabbro, gabbro-dolerity, incl. alkalized (Nos. 9, 14, 15).
5. Gabbrodiorite-diorite (Nos. 12, 26).
6. Lamprophyre of spessartite type (Nos. 18, 25) and kersantite (No. 27).

It should be noted that moderate alkaline and alkalized differences (with the exception of lamprophyres and relatively coarse-grained gabbroids) are quite difficult to identify in conventional petrographic studies; and the presence of potassium feldspar is mainly determined by using more detailed physical methods of research – a scanning electron microscope (SEM). Micrographs of individual species of dikes are shown in Fig. 4, 5.

The relationship of dikes of different composition within the field is still unclear, although there are separate observations, for example, a distinct intersection (pyroxene) -plagioclase porphyry dikes of the average composition of the dike of corniferous lamprophyre of the spessartite type (Fig. 5).

According to the results of studies of polished thin sections carried out using the JSM-6390LV scanning electron microscope (JEOL) with the IncaEnergy-450 energy-dispersive spectrometer and the CamecaSX100 electron probe microanalyzer, the composition was specified of disseminated minerals in the most common porphyritic dikes – pyroxene-plagioclase of basic composition and amphibole-plagioclase of medium composition (studies were conducted on previously selected samples). It is determined that plagioclase of disseminated minerals in dikes of both types is represented by labradorite with small differences in the content of the anorthite minal. The compositions of pyroxene correspond to augite, and amphibole – hornblende (Table 2).

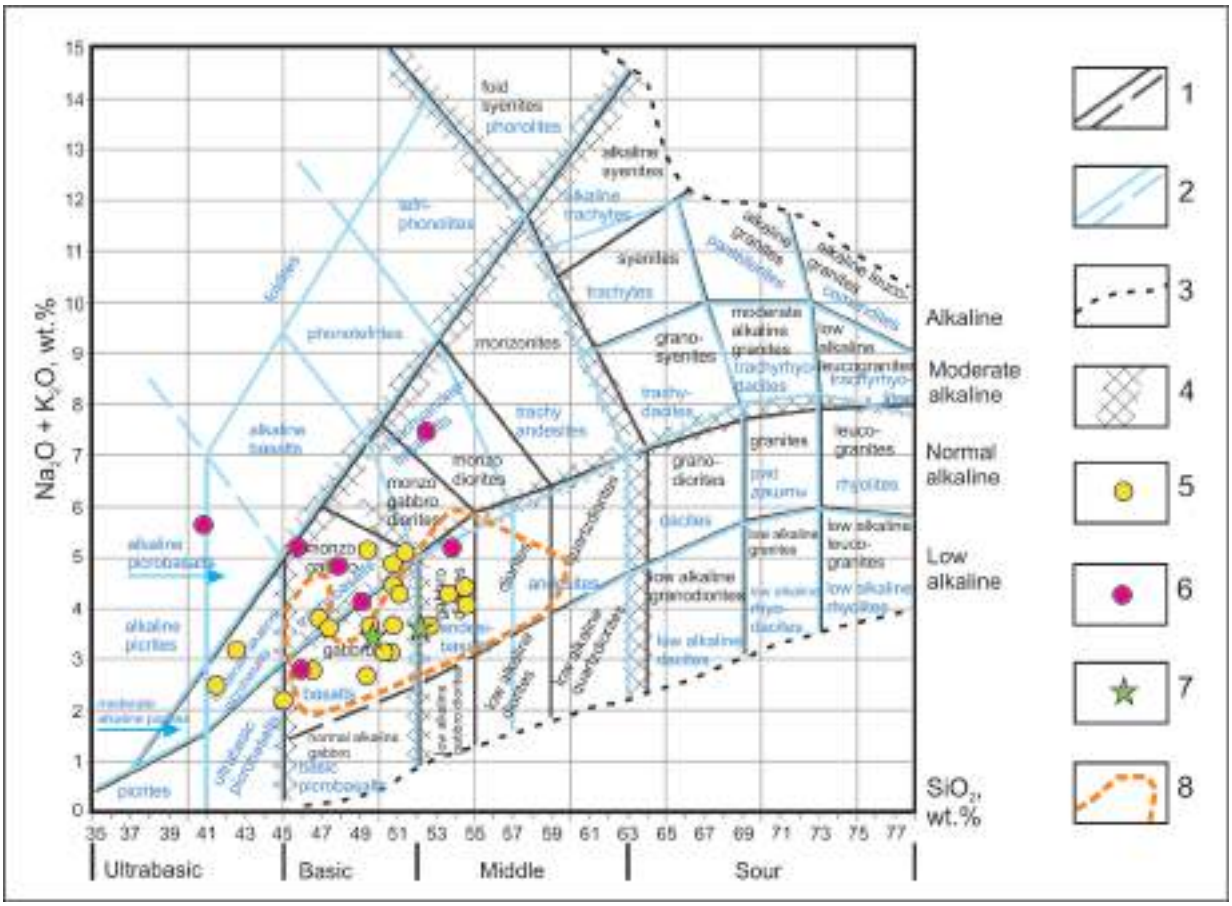



**Figure 3. The position of the dikes of the Vorontsovskoye deposit in the TAS-diagram.** 1 – intrusive rocks; 2 – igneous rocks; 3 – boundaries of the distribution of plutonic rock; 4 – ambiguity areas; 5 – samples of 2017; 6 – samples of 2009 according to [5]; 7 – reported by V. N. Sazonov et al. [3]; 8 – composition of dikes in the Vorontsovskoye deposit (according to geological prospecting data; Ufimtsev, 1968).

**Рисунок 3. Положение даек Воронцовского месторождения на TAS-диаграмме.** 1 – интрузивные породы; 2 – вулканогенные породы; 3 – границы распространения магматических пород; 4 – зоны неопределенности; 5 – пробы 2017 г.; 6 – пробы 2009 г. по [5]; 7 – по В. Н. Сазонову и др. [4]; 8 – составы даек в районе Воронцовского месторождения (по данным геолого-поисковых работ; Уфимцев, 1968).

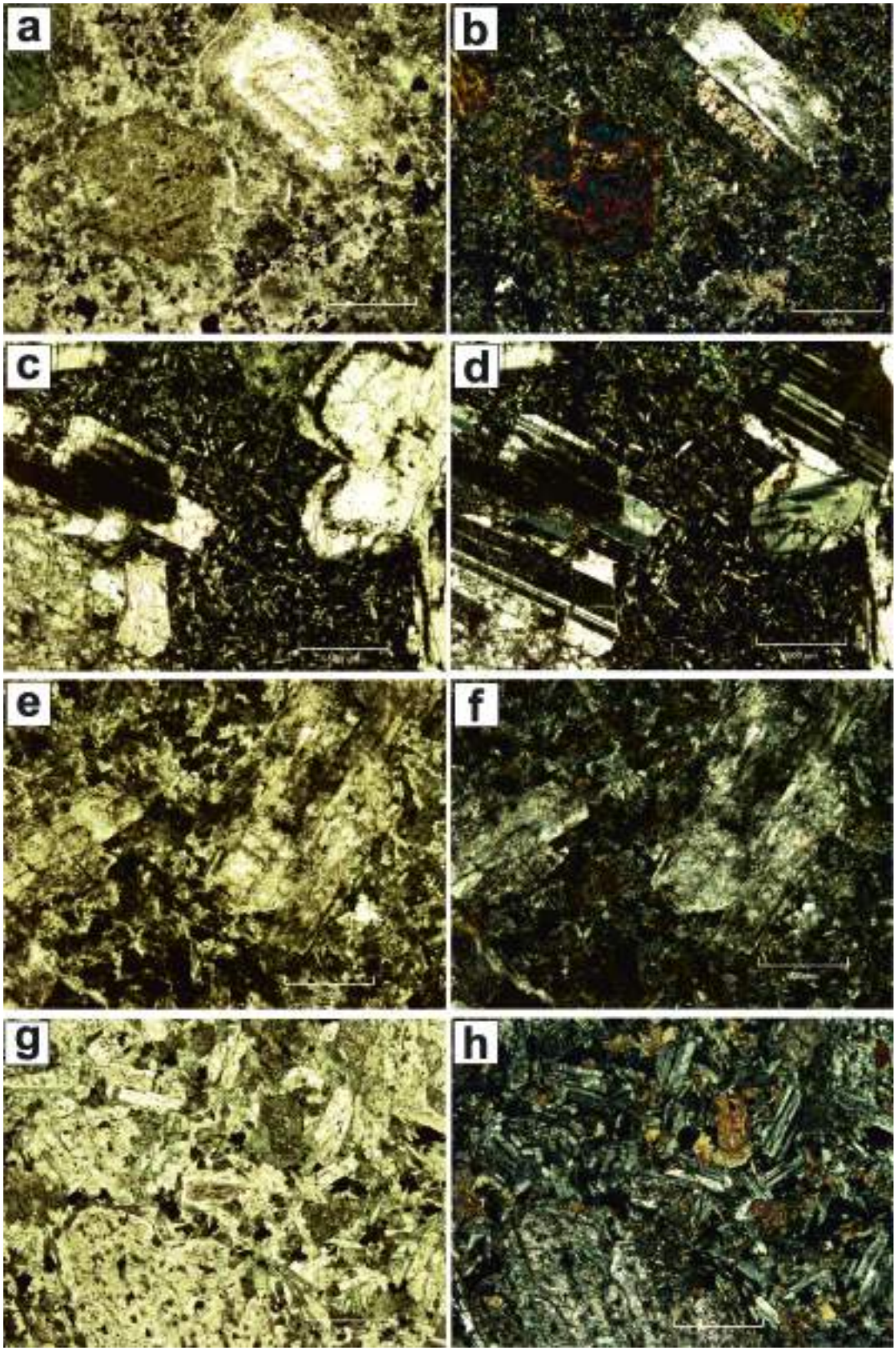



**Figure 4. Photos of thin sections of individual types of dikes of the Vorontsovskoye deposit (on the left hand side – without an analyzer, on the right-hand side – in crossed Nicol). Ruler – 500 microns.** a, b – Px–Pl-porphyry dike of basic composition, sample 4/17 (No. 1); c, d – (Px)–Pl-porphyry dike of andesite-andesite-basalt composition, sample 6/17 (No. 2); e, f – porphyric gabbro-monzogabbro, sample 25/17 (No 9); g, h – porphyric gabbro-diorite, sample 28/17 (No. 12).

**Рисунок 4. Фотографии шлифов отдельных типов даек Воронцовского месторождения (слева – без анализатора, справа – в скрещенных николях).** a, b – Px–Pl-порфировая дайка основного состава, обр. 4/17 (№ 1); c, d – (Px)–Pl-порфировая дайка андезит-андезибазальтового состава, обр. 6/17 (№ 2); e, f – габбро-монцогаббро порфировидное, обр. 25/17 (№ 9); g, h – габбро-диорит порфировидный, обр. 28/17 (№ 12).

**Table 2. The chemical composition of disseminated minerals in the main dikes of the Vorontsovskoye deposit according to microprobe studies.**
**Таблица 2. Химический состав вкрапленников в основных дайках Воронцовского месторождения по данным микрозондовых исследований.**

| $SiO_2$ | $TiO_2$ | $Al_2O_3$ | FeO | MnO | MgO | CaO | $Na_2O$ | $K_2O$ | N | Sample |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | *Plagioclase* | | | | | |
| 51.22 | *0.03* | 29.29 | 0.92 | *0.01* | 0.13 | 13.57 | 3.9 | 0.36 | 4 | Вор-91-5а |
| 51.68 | *0.04* | 29.11 | 0.82 | *0.01* | 0.11 | 13.22 | 4.10 | 0.34 | 5 | Вор-91-5б |
| 52.35 | *0.04* | 29.25 | 0.76 | *0.01* | 0.14 | 11.88 | 4.13 | 0.77 | 7 | Вор-103-2 |
| | | | | | *Clinopyroxene* | | | | | |
| 50.68 | 0.39 | 2.98 | 8.13 | 0.43 | 12.92 | 24.16 | 0.20 | 0.00 | 5 | Вор-91-5 |
| 47.43 | 0.70 | 6.60 | 7.30 | 0.13 | 13.18 | 23.73 | 0.22 | 0.00 | 4 | Вор-91-5 |
| | | | | | *Amphibole* | | | | | |
| 48.5–52.99 | *0.02*–0.34 | 1.59–5.23 | 14.84–17.2 | 0.6–0.82 | 12.23–14.08 | 10.9–12.69 | 0.16–0.57 | 0.04–0.2 | 7 | Вор-103-2 |

Note: N is the number of identifications; values are italicized < 2σ. CamecaMX 100 microprobe analyzer, the Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, the analyst is D. S. Zamyatin).

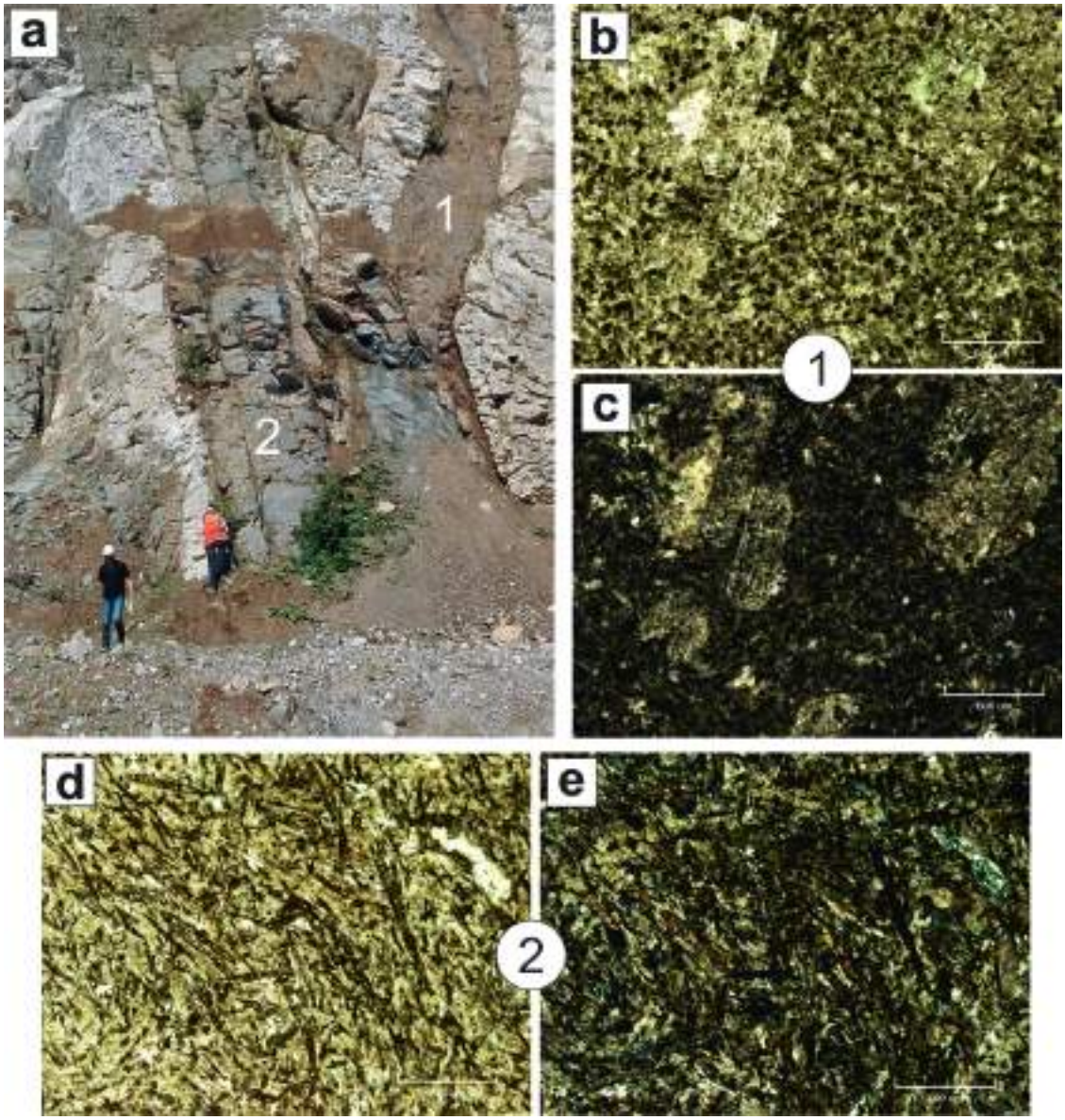



**Figure 5. An example of the relationship of dikes of different composition.** a – suppression of (Px)–Pl-porphyritic dyke of andesite-andesibasalt composition (1) with a dike of spessartite (2); bc – general view in thin section (Px)–Pl-porphyry dike, without analyzer (b) and in crossed nicol (c), sample 34-4-1/17 (No. 17); d, e – general view in thin section of spessartite dikes, without analyzer (d) and in crossed nicol (e), sample 34-2/17 (No. 18).

**Рисунок 5. Пример взаимоотношения даек различного состава.** a – пресечение (Px)–Pl-порфировой дайки андезит-андезибазальтового состава (1) дайкой спессартита (2); b, c – общий вид в шлифе (Px)–Pl-порфировой дайки без анализатора (b) и в скрещенных николях (c), обр. 34-1/17 (№ 17); d, e – общий вид в шлифе дайки спессартита без анализатора (d) и в скрещенных николях (e), обр. 34-2/17 (№ 18).

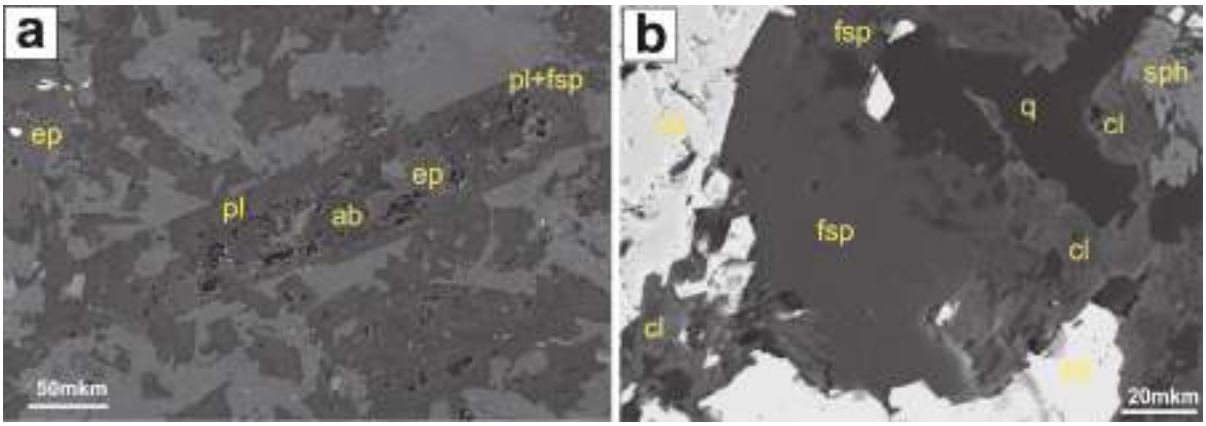



**Figure 6. Peculiarities of potassium feldspar (fsp) release in the initial rock of normal alkalinity (a) and in the area of quartz-kalifeldspar metasomatism (b); sample 4/17.** ab – albite, cl – chlorite, ep – epidote, pl – plagioclase, py – pyrite, q – quartz, sph – sphene.
**Рисунок 6. Особенности выделений КПШ (fsp) в исходной породе нормальной щелочности (a) и на участке кварц-калишпатового метасоматоза (b);** обр. 4/17. ab – альбит, cl – хлорит, ep – эпидот, pl – плагиоклаз, py – пирит, q – кварц, sph – сфен.

In addition, in the detailed studies of polished thin sections in dikes similar in composition (samples 4/17, 6/17), occurrences of quartz-kalifeldspath metasomatism were found. They are small plots and irregularly shaped patches composed by the chlorite-quartz-potassium feldspar-pyrite association (Fig. 6, b). Titanite (sphene) usually occurs, and galenite is sometimes intruded in pyrite. Potassium feldspar is characterized by the admixture of a small amount of barium (Ba, 0.32–0.53% w.). In the same thin sections, potassium and sodium-potassium feldspar were observed in the form of uneven discontinuous margins (with intimate intergrowth) at the edges of disseminated plagioclase (Fig. 6, a) and, in some cases, in the form of patches (antiperthites?) in the inner parts of large disseminated minerals. It can be assumed that this potassium feldspar is "petrean" or that associated with some previous process of kalifeldsparization.

In the process of exploratory development in 2009–2010, occurrences of intense kalifeldsparization in tuff siltstones were identified at the Vorontsovskoye deposit within one of the ore blocks opened by the existing open-cut mining [6]. Optically, these kalifeldsparized sites did not stand out and were detected by abnormally high potassium levels (up to 7–10% of weight according to ICP-MS). Potassium feldspar in metasomatites is represented by a fine-grained aggregate (20–50 μm, rarely up to 200 μm) in association with quartz. According to the results of microprobe determinations and X-ray diffraction analysis of rocks, it can be assumed that these are orthoclase and/or sanidine. It should also be noted that earlier V. N. Sazonov with his coauthors [3] identified propylitized rocks in the area of the deposit with ice spar replacing plagioclase.

## Discussion of results and conclusions

The importance of dikes in the formation of the Vorontsovskoye gold-ore deposit remains debated. Typically, the "dense" dike ore fold is observed only within the deposit, which confirms the important role of dikes as a factor of structural control [4]. The dike complexes of most Carlin-type deposits of the state of Nevada (USA) [4, 7, 8–10] and separate objects within the territory of the PRC [11–13] have the same importance.

The role of dikes as a magmatic factor is more difficult. In the eastern part of Nevada, where a large number of deposits of this type are found, four cases of magmatic activity are noted; one of them (magmatism of the Eocene period) is considered to be important in the formation of ore mineralization [4, 7, 10]. As for the Vorontsovskoye deposit is concerned, most researchers assume some kind of connection of gold mineralization with magmatic and post-magmatic processes, but there is no certainty in this matter. In this regard, an important result is the identification of occurrences of kalifeldspath (quartz-kalifeldspath) metasomatism, which is presumably associated with dikes of increased alkalinity and may play a role in the formation of gold-ore mineralization. These dikes are most likely referred to the Auerbah complex, the 2nd and 3rd phases of which have a sub-alkaline and high-potassium specialization (The tale of the Urals series..., A. V. Zhdanov, 2009). At the same time, occurrences of kalifeldspath metasomatism may lend credence to assumptions of O. V. Minina [14], A. I. Grabezhev [15] and some other researchers concerning the possible belonging of gold-ore mineralization to the upper and/or peripheral parts of a large porphyry system.

## Acknowledgements

This work was performed within the framework of the state order of the Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (State registration No AAAA-A18-118052590030-2).

## REFERENCES

1. Sazonov V. N., Murzin V. V., Grigoriev N. A. 1998, Vorontsovskoe gold deposit – an example of mineralization of the Carlin type in the Urals. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy* [Geology of Ore Deposits], vol. 40, no. 2, pp. 157–170. (*In Russ.*)
2. Murzin V. V., Naumov E. A., Azovskova O. B., Varlamov D. A., Rovnushkin M. Yu., Pirajno F. 2017, The Vorontsovskoe Au–Hg–As ore deposit (Northern Urals, Russia): Geological setting, ore mineralogy, geochemistry, geochronology and genetic model. *Ore Geology Reviews*, vol. 85, pp. 271–298. https://dx.doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.10.037
3. Vikentyev I. V., Tyukova E. E., Murzin V. V. et al. 2016, *Vorontsovskoye zolotorudnoye mestorozhdeniye. Geologiya, formy zolota, genezis* [The Vorontsovskoe gold ore deposit. Geology, forms of gold, genesis]. Ekaterinburg, 206 p.
4. Sazonov V. N., Murzin V. V., Grigoriev N. A., Gladkovsky B. A. 1991, *Endogennoye orudeneniye devonskogo andezitoidnogo vulkano-plutonicheskogo kompleksa (Ural)* [Endogenetic ore mineralization of the Devonian andesitoid volcano-plutonic complex (Ural)]. Sverdlovsk, 184 p.
5. Nechkin G. S., Rovnushkin M. Yu. 2011, Sulfide dike mineralization at the Vorontsovskoye gold deposit (Auerbah complex, Northern Urals), *Ezhegodnik*-2010 [Yearbook-2010], vol. 158, pp. 187–190. (*In Russ.)*

6. Rovnushkin M. Yu., Gulyaeva, T. Ya., Galakhova O. L. 2010, Occurrence of kalifeldspath metasomatism within the Vorontsovskoye gold-ore deposit. *Ezhegodnik*-2010 [Yearbook-2010], vol.157, pp. 241–244. (*In Russ.)*
7. Cline J. S., Hofstra F. F. 2000, Ore-fluid evolution at the Getchell Carlin-type gold deposit, Nevada, USA. *European Journal of Mineralogy*, vol.12, no. 1, pp. 195–212. https://dx.doi.org/10.1127/ejm/12/1/0195
8. Cline J. S., Hofstra F. F., Muntean J. L. et al. 2005, Carlin-type gold deposits in Nevada: critical geologic characteristics and viable models. *Economic Geology*. 100th Anniversary volume, pp. 451–484. URL: https://pyrite.utah.edu/fieldtrips/SEGFnevada2007/Readings/General_CTD/Cline2005.pdf
9. Ressel M. W., Henry C. D. 2006, Igneous geology of the Carlin Trend, Nevada: development of the eocene plutonic complex and significance for Carlin-type gold deposits. *Economic Geology*, vol.101, no. 2, pp. 347–383. https://doi.org/10.2113/econgeo.105.5.971
10. Almeida C. M., Olivo G. R., Chouinard A., Weakly Ch., Poirier G. 2010, Mineral Paragenesis, alteration, and geochemistry of the two types of gold ore and the host rocks from the Carlin-type deposits in the southern part of the Goldstrike Property, Northern Nevada: implications for sources of ore-forming elements, ore genesis, and mineral exploration. *Economic Geology*, vol.105, pp. 971–1004.
11. Liu J., Dai H., Zhai D., Wang J., Wang Y, Yang L., Mao G. et al. 2015, Geological and geochemical characteristics and formation mechanism of the Zhaishang Carlin-like type gold deposit, western Qinling Mountains, China. *Ore Geology Reviews*, vol. 64. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.07.016
12. Wang L., Zhu Y. 2015, Multi-stage pyrite and hydrothermal mineral assemblage of the Hatugold district (west Junggar, Xinjiang, NW China): Implications formetallogenic evolution. *Ore Geology Reviews*, vol. 69, pp. 243–267. https://dx.doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.02.021
13. Zhu J.-J., Hu R.-Zh., Richards J. P., Bi X.-W., Stern R., Lu G. 2017, No genetic link between Late Cretaceous felsic dikes and Carlin-type Au deposits in the Youjiang basin, Southwest China. *Ore Geology Review*s, vol. 84, pp. 328–337. https://dx.doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.01.014
14. Minina O. V. 1994, Auerbah complex ore-magmatic system in the Middle Urals. *Otechestvennaya geologiya* [Russian Geology], No. 7, pp. 17–23. (*In Russ.)*
15. Grabezhev A. I., Ronkin Yu. L., Puchkov V. N., Gerdes A., Rovnushkin M. Yu. 2014, Krasnoturyinsk copper-scarn ore field (Northern Urals): U-Pb age of ore-controlling diorites and their place in the metallogeny of the region. *Doklady Akademii nauk* [Doklady Earth Sciences], vol. 456, no. 4, pp. 443–447. (*In Russ*.) https://doi.org/10.7868/S0869565214160191

*The article was received on December 18, 2018*

УДК 551.222: 552.086: 553.41 (234.851) https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-1-18-27

# Петрохимические особенности дайкового комплекса Воронцовского золоторудного месторождения (Северный Урал)

**Оксана Борисовна АЗОВСКОВА***,
**Михаил Юрьевич РОВНУШКИН****,
**Елена Индустровна СОРОКА*****

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

***Актуальность работы.*** Воронцовское месторождение обладает характерными чертами «карлинского» типа и является одним из самых крупных золоторудных месторождений Урала, однако в настоящее время оно практически выработано, а объекты-аналоги в регионе не выявлены. Дайковый комплекс штокверкового типа ранее на месторождении не изучался. Проводимые исследования могут способствовать уточнению как модели формирования оруденения, так и прогнозно-поисковой модели.
***Цель работы.*** Изучение состава и петрохимических особенностей дайкового комплекса Воронцовского месторождения как одного из возможных факторов формирования золотого оруденения.
***Методы исследований.*** Проведены замеры элементов залегания даек в пределах действующего карьера с вынесением результатов на азимутальную сетку. Выполнен силикатный анализ образцов даек, использованы также имеющиеся данные прошлых лет. Петрографическое изучение даек сопровождалось исследованием образцов при помощи сканирующего электронного микроскопа JSM-6390LV (JEOL) с ЭДС-спектрометром IncaEnergy 450 и электронно-зондового микроанализатора Cameca SX100.
***Результаты работы.*** На первом этапе исследований уточнена структурная позиция даек, проведено обобщение результатов петрографических, петрохимических работ и данных, полученных на микроанализаторах. Установлено значительное преобладание основных даек при вариациях составов от пикробазальта до габбродиорита (андезибазальта). Выявлена группа даек с повышенной и высокой щелочностью (в том числе лампрофиры) с составами от умеренно-щелочного и щелочного пикробазальта до монцодиорита (трахиандезибазальта). В дайках нормального ряда зафиксированы проявления калишпатового метасоматоза с минеральной ассоциацией хлорит-кварц-КПШ-пирит (± галенит). Ранее участки калишпатизации наблюдались во вмещающих туфоалевролитах.
***Выводы.*** Наличие дайкового штокверка можно рассматривать как положительный структурный фактор в образовании месторождения. Его роль как магматического фактора неясна, однако можно предположить, что проявления калишпатизации генетически связаны с дайками повышенной щелочности.

*Ключевые слова:* Северный Урал, Воронцовское золоторудное месторождение, дайки, петрохимия, калишпатовый метасоматоз, карлинский тип.

*Работа выполнена в рамках темы государственного задания ИГГ УрО РАН (гос. регистрации №АААА-А18-118052590030-2).*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Сазонов В. Н., Мурзин В. В., Григорьев Н. А. Воронцовское золоторудное месторождение – пример минерализации карлинского типа на Урале // Геология рудных месторождений. 1998. Т. 40, № 2. С. 157–170.
2. Murzin V. V., Naumov E. A., Azovskova O. B., Varlamov D. A., Rovnushkin M. Yu., Pirajno F. The Vorontsovskoe Au–Hg–As ore deposit (Northern Urals, Russia): Geological setting, ore mineralogy, geochemistry, geochronology and genetic model // Ore Geology Reviews. 2017. Vol. 85. P. 271–298. https://dx.doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.10.037
3. Викентьев И. В., Тюкова Е. Э., Мурзин В. В. и др. Воронцовское золоторудное месторождение. Геология, формы золота, генезис. Екатеринбург: Форт Диалог-Исеть, 2016. 206 с.
4. Сазонов В. Н., Мурзин В. В., Григорьев Н. А., Гладковский Б. А. Эндогенное оруденение девонского андезитоидного вулкано-плутонического комплекса (Урал). Свердловск: УрО АН СССР, 1991. 184 с.
5. Нечкин Г. С., Ровнушкин М. Ю. Сульфидная околодайковая минерализация на Воронцовском месторождении золота (Ауэрбаховский комплекс, Северный Урал) // Ежегодник-2010: труды ИГГ УрО РАН. 2011. Вып. 158. С. 187–190.
6. Ровнушкин М. Ю., Гуляева Т. Я., Галахова О. Л. Проявление калишпатового метасоматоза в пределах Воронцовского золоторудного месторождения // Ежегодник-2009: труды ИГГ УрО РАН. 2010. Вып. 157. С. 241–244.
7. Cline J. S., Hofstra F. F. Ore-fluid evolution at the Getchell Carlin-type gold deposit, Nevada, USA // European Journal of Mineralogy. 2000. Vol. 12, № 1. P. 195–212. https://dx.doi.org/10.1127/ejm/12/1/0195
8. Cline J. S., Hofstra F. F., Muntean J. L. et al. Carlin-type gold deposits in Nevada: critical geologic characteristics and viable models // Economic Geology. 2005. 100th Anniversary Volume, № 3. P. 451–484. URL: https://pyrite.utah.edu/fieldtrips/SEGFnevada2007/Readings/General_CTD/Cline2005.pdf
9. Ressel M. W., Henry C. D. Igneous geology of the Carlin Trend, Nevada: development of the eocene plutonic complex and significance for Carlin-type gold deposits // Economic Geology. 2006. Vol. 101, № 2. P. 347–383. https://dx.doi.org/10.2113/gsecongeo.101.2.347
10. Almeida C. M., Olivo G. R., Chouinard A., Weakly Ch., Poirier G. Mineral Paragenesis, alteration, and geochemistry of the two types of gold ore and the host rocks from the Carlin-type deposits in the southern part of the Goldstrike Property, Northern Nevada: implications for sources of ore-forming elements, ore genesis, and mineral exploration // Economic Geology. 2010. Vol. 105, № 5. P. 971–1004. https://doi.org/10.2113/econgeo.105.5.971
11. Liu J., Dai H., Zhai D., Wang J., Wang Y., Yang L., Mao G. et al. Geological and geochemical characteristics and formation mechanism of the Zhaishang Carlin-like type gold deposit, western Qinling Mountains, China // Ore Geology Reviews. 2015. Vol. 64. P. 273–298. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.07.016
12. Wang L., Zhu Y. Multi-stage pyrite and hydrothermal mineral assemblage of the Hatugold district (west Junggar, Xinjiang, NW China): Implications for metallogenic evolution // Ore Geology Reviews. 2015. Vol. 69. P. 243–267. https://dx.doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.02.021

* ✉ oazovskova@yandex.ru
http://orcid.org/0000-0003-4251-7414
**rovn@list.ru
https://orcid.org/0000-0003-1759-2818
***soroka@igg.uran.ru
http://orcid.org/0000-0003-1360-6274

13. Zhu J.-J., Hu R.-Zh., Richards J. P., Bi X.-W., Stern R., Lu G. No genetic link between Late Cretaceous felsic dikes and Carlin-type Au deposits in the Youjiang basin, Southwest China // Ore Geology Reviews. 2017. Vol. 84. P. 328–337. https://dx.doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.01.014
14. Минина О. В. Ауэрбаховская комплексная рудно-магматическая система на Среднем Урале // Отечественная геология. 1994. № 7. С. 17–23.
15. Грабежев А. И., Ронкин Ю. Л., Пучков В. Н., Гердес А., Ровнушкин М. Ю. Краснотурьинское медно-скарновое рудное поле (Северный Урал): U–Pb возраст рудоконтролирующих диоритов и их место в схеме металлогении региона // ДАН. 2014. Т. 456, № 4. С. 443–447.

*Статья поступила в редакцию 18 декабря 2018 г.*

УДК 549.612(571.63) https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-1-28-38

# About chemistry of tourmaline from Mnogovershinnoe ore deposit (Khabarovsk Krai, Far East)

**Ivan Andreevich BAKSHEEV***,
**Evgeniy Alekseevich VLASOV****

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

***Relevance of the work*** is due to the need to study the mineralogy of gold deposits in the Russian Far East, information about which is extremely scarce.
***Purpose of the work:*** study of the chemical composition of tourmaline from Mnogovershinnoe ore deposit, Khabarovsk Krai (Far East).
***Methodology of research:*** The chemical composition of minerals and BSE images were obtained using a Jeol JSM-6480 electron microscope equipped with an Inca Energy-350 EDS (analyst is N. N. Koshlyakova, Department of Petrology, Lomonosov Moscow State University). Electron microscope shooting environment: accelerating voltage is 15 kV, measuring current for the sample is 30 ± 0.1 nA. XPP corrections were used for the adjustment procedure (INCA program, version 17a).
***Results.*** The obtained data show that tourmalines of the Mnogovershinnoe deposit differ in their chemical composition and type of substitution. All studied tourmalines by these parameters can be divided into two groups. Group 1 includes schorl, foitite, and pegmatoids feruvite, as well as schorl and foitite of the first generation, tourmaline-muscovite-quartz veinlet in sandstones. Group 2 includes schorl of the second generation, tourmaline-muscovite quartz veinlet, schorl and foitite of quartz-tourmaline metasomatites, and cement dravite of quartz breccia.
***Conclusions.*** Tourmalines of the post-ore mineral associations of the Mnogovershinnoe gold deposit are divided into two groups characterized by different chemical composition and substitutions. Tourmalines of the first group with substitutions Fe ↔ Mg and X-vacancy + Al ↔ Na + $R^{2+}$ are confined to pegmatoids and were formed in reducing or weakly oxidative conditions. Later tourmalines of the second group with substitutions $Fe^{3+}$ ↔ Al and Al + $O^{2-}$ ↔ $R^{2+}$+ $OH^-$ indicate a possible porphyry-style mineralization and its formation during lowering oxidative potential.

*Keywords:* tourmaline, chemical composition, altered rocks, Mnogovershinnoe deposit, Khabarovsk Krai, Far East.

## Introduction

Tourmaline-supergroup minerals with the general formula $XY_3Z_6$ $[T_6O_{18}]$ $[BO_3]_3V_3W$, where X = Na, Ca, K, □ (vacancy); Y = Li, Mg, $Fe^{2+}$, $Mn^{2+}$, Ni, Al, $Cr^{3+}$, $V^{3+}$, $Fe^{3+}$, ($Ti^{4+}$); Z = Mg, $Fe^{2+}$, Al, $Fe^{3+}$, $V^{3+}$, $Cr^{3+}$; T = Si, Al, (B) ($Fe^{3+}$); B = B, □; V = OH, O; W = OH, F, O [1] are stable in the range from low-temperature hydrothermal conditions to magmatic and high pressured metamorphic conditions. They are characterized by an extraordinary variety of chemical composition and various types of chemical substitutions, which allows us to consider tourmalines as an indicator of mineral formation conditions and an important criterion for prospection and exploration [2–4].

Tourmalines are widespread in some types of gold and gold-polymetallic deposits: porphyry gold (Darasun, Kariyskoye), intrusion related, where they are constitute of barren propylite (Berezovskoye, the middle Urals; Berezitovoe, Transbaikal Krai), hydrothermal-metamorphic or orogenic (Hutti, India; Loulo, Mali; Sigma, Canada). Tourmaline is not typical for igneous gold deposits. However, it is found in some sites where its formation is associated with pre-ore or post-ore processes. This type of deposits includes Mnogovershinnoe in the Khabarovsk Krai, in which the formation of tourmaline is associated with hydrothermal activity due to the intrusion of post-mineral granitoids [5].

Despite the history of half a century for studying the field, information about tourmaline is scarce, and data on the chemical composition are not available. Therefore, the purpose of this study is to characterize the chemical composition of tourmaline to determine its formational identity and the assumption on this basis about the presence of possible new types of mineralization for the deposit.

## Brief geology

The Mnogovershinnoe gold deposit is located in the Nikolaevskiy region of the Khabarovsk Krai, 135 km north of Nikolaevsk-on-Amur and 17 km from the coast of the Sea of Okhotsk. It was discovered in 1959; the detailed exploration began in 1963, and acquisition – in 1991.

The deposit is a part of the ore field having the same name located at the northern termination of the East Sikhote-Alin volcanic belt at the joint of the Amgunsky and Gorinsky synclinoria of the Sikhote-Alin folded region [6, 7]. The ore field is confined to the Ula volcano-plutonic structure. The ore field is bounded by the Middle Ula and the Kulibinsky latitudinal deep faults from the north and south; the Malakhtinskaya tectonic depression from the northwest; the compound contact of the Bekchi-Ula granitoid pluton from the southeast. The structure of the ore field is two-staged. The lower stage is formed by folded Lower Cretaceous sandstones, mudstones and siltstones. The upper stage is the Paleocene volcanic rocks dominated by vent and subvolcanic facies. The rocks of overlapped facies are almost completely eroded. Volcanic rocks are represented by lavas and tuffs of andesites and andesidacites. Both structural complexes are intruded by the large Bekchi-Ula massif of granitoids, at the northwestern contact of which the Mnogovershinnoye deposit is located. The massif here is the Early Eocene porphyry monzogranodiorites of the first phase. The second intrusive phase is leucocratic and pegmatoid granites. Sandy and clay rocks contacted with the pluton are transformed into hornfelses. In the southwestern part of the ore field, subjacent intrusives of Eocene porphyritic quartz diorite and granodiorite-porphyries were eroded. The volcanic and intrusive rocks are intruded by the Eocene-Oligocene dikes of porphyritic diorite, andesite, basalt, and granite porphyry of north-west and latitudinal strike [5, 8, 9].

* ✉ baksheev@geol.msu.ru
https://orcid.org/0000-0001-6920-427X
**user420@geol.msu.ru

The Mnogovershinnoe deposit is divided into two parts separated by the Left Ula NW-trending fault along the Left Ula valley. Gold mineralization is localized in five zones: Glavnaya, Promezhutochnaya, Vodorazdelnaya, Medvezhya and Salali. Economic ore-bodies emerging to the surface are situated exclusively on the right bank, where they are related to the steeply dipping north-eastern zones (Tsentralnoe, Verkhnee, Promezhutochnoe, Yuzhnoe, Flangovoe, Severnoe, Tikhoe, Valunistoe, Olenye, Vodorazdelnoe ore bodies). Numerous thin gold-bearing quartz veins of the northwestern and latitudinal strike in sedimentary rocks are known on the left bank (Evatak, Kulibinsky, Konechny, and other sections). The K/Ar age of gold mineralization is 49–69 Ma [10].

Within the ore zones, the contours of economic mineralization are determined by sampling. The length of ore loads along strike is 50–800 m with a thickness from 0.3 to 7 m. Ore bodies are composed of quartz (95–97%); the amount of ore minerals is 3–5%. The main ore minerals are pyrite, sphalerite, galena, chalcopyrite; the secondary ones include pyrrhotite, tennantite-tetrahedrite, native gold, electrum, hessite, bornite, acanthite, and marcasite.

Gold (fineness is 750–950) is the main useful component and forms impregnation in quartz and sulphides [5].

## Analytical techniques

The backs-scattered electron images (BSE) were obtained using a Jeol JSM-6480 scanning electron microscope equipped with an Inca Energy-350 EDS operated at an accelerating voltage of 15 kV and the current intensity 14–16 nA (analyst N. N. Koshlyakova, Department of Petrology, Moscow State University).

The chemical composition of tourmalines and muscovite was studied using a Jeol JSM-6480 electron microscope equipped with an Inca Energy-350 EDS (analyst N. N. Koshlyakova, Department of Petrology, Moscow State University), operated at accelerating volt-

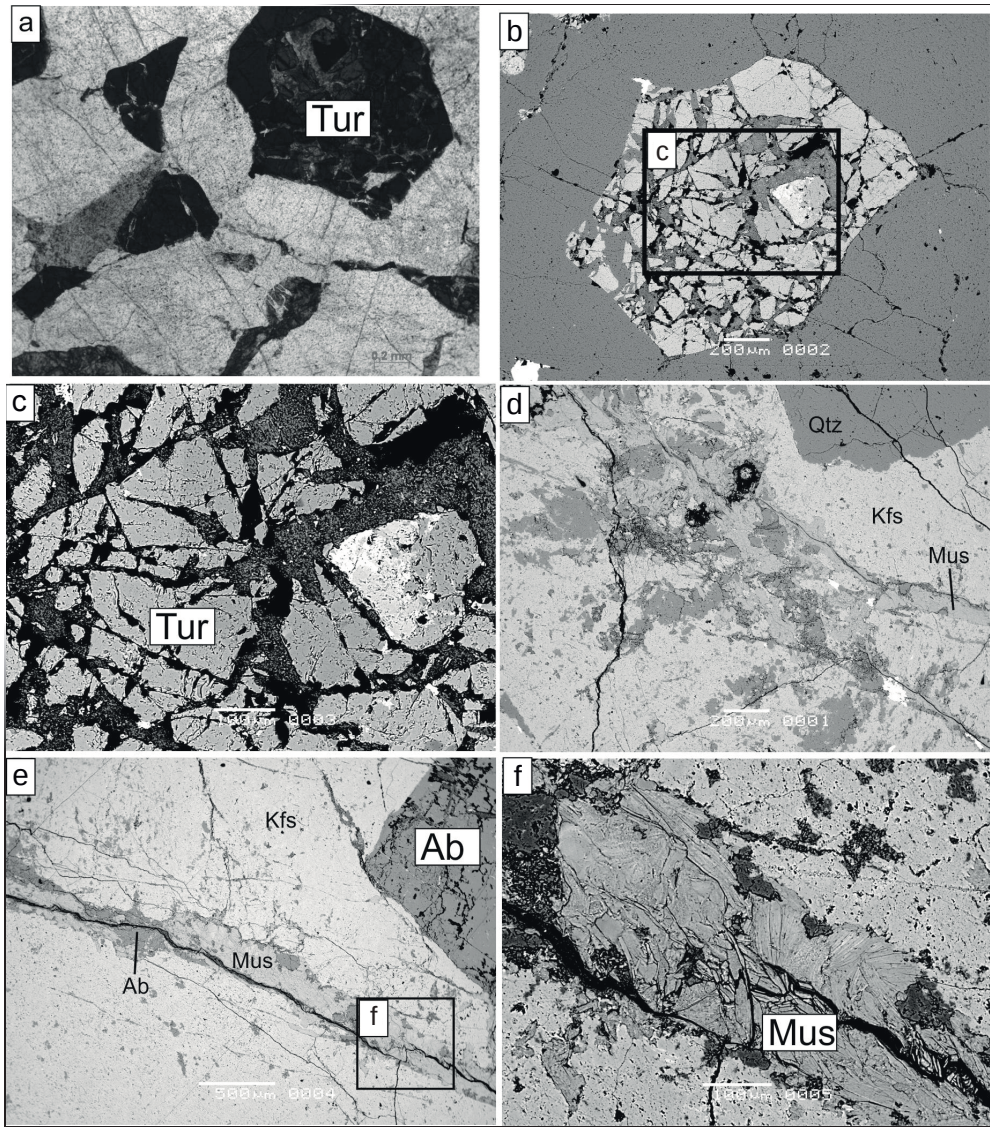



**Figure 1. Relationships of pegmatoid minerals of the Zamanchivy site. a–c** – brecciated optically zoned schorl crystal, some sectors in the central part of which are enriched potassium feldspar Ca (to uvite) and depleted in Na (to foitite), fractures are healed by the albite-muscovite aggregate; **d** – albite-muscovite vein in potassium feldspar; **e** – intergrowth of albite and potassium feldspar; inclusions of potassium feldspare are observed in albite; **f** – enlarged fragment **e** showing of muscovite segregations. Sample MN-2. Photo: **a** – cross polars, without nicols (**b–f**) back scattered electrons.

**Рисунок 1. Взаимоотношения минералов пегматоидов участка Заманчивый. a–c** – брекчированный оптически зональный кристалл шерла, отдельные секторы в центральной части которого обогащены Ca (до увита) и обеднены Na (до фойтита), трещины залечены альбит-мусковитовым агрегатом; **d** – альбит-мусковитовый прожилок в калишпате; **e** – срастание альбита и калишпата, в альбите отмечаются вростки калишпата; **f** – увеличенный фрагмент **e**, показывающий скопление мусковита. Образец МН-2. Фото. **a** – в проходящем свете, без николей; **b–f** – в отраженных электронах.

**Table 1. The average chemical composition (wt. %) of tourmaline.**
**Таблица 1. Средний химический состав (мас. %) турмалина.**

| Comp. | MN-2 | MN-4, generation I | MN-4, generation II | MN-7 | MN-33, generation I | MN-33, generation II |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $SiO_2$ | 34.65 (32.91–36.89) | 33.99 (32.36–35.17) | 34.64 (34.23–35.38) | 35.75 (35.14–36.18) | 34.34 (33.73–35.03) | 33.94 (33.13–34.60) |
| $TiO_2$ | 0.57 (0.27–1.02) | 0.86 (0.20–1.15) | 0.42 (0.21–0.93) | 0.40 (0.15–0.72) | 0.56 (bdl –1.33) | 0.13 (bdl –0.26) |
| $V_2O_3$ | 0.03 (bdl –0.09) | bdl | bdl | bdl | 0.03 (bdl –0.18) | bdl |
| $Al_2O_3$ | 32.32 (26.40–36.13) | 35.54 (34.05–37.39) | 31.27 (30.39–33.83) | 33.96 (31.45–35.71) | 29.13 (24.71–33.84) | 25.95 (20.56–37.78) |
| ZnO | 0.04 (bdl –0.12) | 0.07 (bdl –0.17) | bdl | bdl | bdl | bdl |
| MnO | 0.21 (0.05–0.50) | 0.27 (0.21–0.33) | 0.06 (bdl –0.11) | 0.03 (bdl –0,07) | 0.02 (b.d.l. –0.14) | bdl |
| $FeO_{gen}$ | 10.92 (4.68–16.94) | 10.02 (8.30–12.42) | 13.86 (11.39–15.87) | 5.68 (4.47–7.34) | 13.63 (6.98–19.47) | 19.18 (12.18–24.07) |
| MgO | 4.48 (2.48–8.12) | 3.06 (1.03–5.17) | 3.36 (2.58–4.56) | 7.07 (6.74–7.89) | 5.06 (3.05–7.17) | 3.95 (0.75–5.03) |
| CaO | 1.25 0.20–3.38 | 0.68 (0.14–0.96) | 0.58 (0.39–1.13) | 0.74 (0.42–1.26) | 1.31 0.58–1.98 | 0.96 (0.40–81.54) |
| $K_2O$ | 0.02 (bdl –0.09) | 0.04 (bdl –0,07) | bdl | 0.05 (0.03–0.07) | 0.03 (bdl –0,07) | 0.05 (bdl –0.09) |
| $Na_2O$ | 1.54 (0.96–2.59) | 1.46 (1.23–1.67) | 1.83 (1.48–2.11) | 1.89 (1.69–2.20) | 1.90 (1.49–2.44) | 2.02 (1.08–2.49) |
| $B_2O_3$ | 10.34 (9.93–10.74) | 10.40 (10.24–10.55) | 10.25 (10.13–10.48) | 10.59 (10.38–10.71) | 10.21 (9.98–10.54) | 10.03 (9.89–10.31) |
| $H_2O$ | 3.42 (3.15–3.53) | 3.31 (3.24–3.39) | 3.53 (3.49–3.60) | 3.41 (3.27–3.49) | 2.64 (3.44–3.63) | 3.46 (3.21–3.51) |
| Total | 99.78 (98.12–100.59) | 99.70 (98.69–100.23) | 99.81 (99.43–100.47) | 99.56 (98.63–100.08) | 98.85 (98.42–100.32) | 99.67 (99.29–99.86) |
| | | | *Formula based on 15 cations* | | | |
| Si | 5.826 (5.696–5.972) | 5.680 (5.471–5.794) | 5.873 (5.868–5.881) | 5.867 (5.844–5.891) | 5.848 (5.674–5.903) | 5.880 (5.585–5.987) |
| $^{T}Al$ | 0.174 (0.028–0.304) | 0.320 (0.206–0.529) | 0.127 (0.119–0.132) | 0.133 (0.109–0.156) | 0.152 (0.097–0.326) | 0.120 (0.013–0.415) |
| ΣT | 6.000 | 6.000 | 6.000 | 6.000 | 6.000 | 6.000 |
| $^{Z}Al$ | 6.000 (5.162–6.000) | 6.000 | 6.000 (5.944–6.000) | 6.000 | 5.694 (4.924–6.000) | 5.180 (4.218–6.000) |
| $^{Z}Mg$ | 0 (0–0.838) | – | 0 (0–0.056) | – | 0.306 (0–1.076) | 0.820 (0–1.311) |
| $^{Z}Fe^{3+}$ | – | – | – | – | – | 0 (0–0.531) |
| ΣZ | 6.000 | 6.000 | 6.000 | 6.000 | 6.000 | 6.000 |
| $^{Y}Mg$ | 1.121 (0.539–1.974) | 0.762 (0.260–1.275) | 0.849 (0–1.098) | 1.730 (1.635–1.934) | 0.980 (0.045–1.751) | 0.202 (0–0.777) |
| $Fe^{2+}$ | 1.536 (0.634–2.251) | 1.402 (1.150–1.765) | 1.882 (1.581–2.089) | 0.780 (0.606–1.028) | 1.744 (0.964–2.344) | 1.920 (1.719–2.153) |
| $^{Y}Al$ | 0.232 (0–0.854) | 0.681 (0.401–1.057) | 0.122 (0–0.481) | 0.437 (0.088–0.701) | 0 (0–0.301) | 0 (0–1.093) |
| $^{Y}Fe^{3+}$ | 0 (0–0.268) | – | 0.084 (0–0.194) | – | 0.198 (0–0.556) | 0.861 (0–1.783) |
| Ti | 0.072 (0.033–0.131) | 0.109 (0.025–0.146) | 0.054 (0.027–0.118) | 0.050 (0.018–0.091) | 0.071 (0–0.173) | 0.017 (0–0.034) |
| V | 0.004 (0–0.013) | – | – | – | 0.004 (0–0.024) | – |
| Zn | 0.005 (0–0.015) | 0.008 (0–0.021) | – | – | – | – |
| Mn | 0.030 (0.007–0.074) | 0.038 (0.030–0.048) | 0.009 (0.000–0.016) | 0.004 (0.000–0.009) | 0.002 (0.000–0.019) | – |
| ΣY | 3.000 | 3.000 | 3.000 | 3.000 | 3.000 | 3.000 |
| Na | 0.502 (0.315–0.814) | 0.475 (0.394–0.539) | 0.603 (0.475–0.702) | 0.601 (0.548–0.694) | 0.628 (0.475–0.782) | 0.678 (0.353–0.848) |
| X-vac. | 0.272 (0.069–0.499) | 0.404 (0.289–0.580) | 0.292 (0.227–0.454) | 0.269 (0.215–0.322) | 0.132 (0.079–0.260) | 0.144 (0.048–0.470) |
| Ca | 0.225 (0.035–0.616) | 0.122 (0.026–0.172) | 0.106 (0.071–0.205) | 0.130 (0.073–0.223) | 0.240 (0.102–0.365) | 0.178 (0.090–0.288) |

| Comp. | MN-2 | MN-4, generation I | MN-4, generation II | MN-7 | MN-33, generation I | MN-33, generation II |
|---|---|---|---|---|---|---|
| K | 0.005 (0–0.019) | 0.008 (0.000–0.014) | – | – | 0.006 (0–0.015) | 0.010 (0–0.020) |
| ΣX | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| $^{V}OH^{-}$ | 3.000 | 3.000 | 3.000 | 3.000 | 3.000 | 3.000 |
| $^{W}OH^{-}$ | 0.837 (0.591–1.000) | 0.695 (0.653–0.749) | 1.000 (0.979–1.000) | 0.737 (0.543–0.878) | 1.000 (0.914–1.000) | 1.000 (0.616–1.000) |
| $^{W}O^{2-}$ | 0.163 (0–0.409) | 0.305 (0.251–0.347) | 0 (0–0.021) | – | 0 (0.042–0.086) | 0 (0–0.384) |
| $Fe_{tot}$ | 1.536 (0,634–2,482) | 1.402 (1.150–1.765) | 1.966 (1.581–2.275) | 0.780 (0.606–1.028) | 1.942 (0.964–2.837) | 2.781 (1.719–3.531) |
| $Mg_{tot}$ | 1.122 (0.616–1.974) | 0.762 (0.260–1.275) | 0.849 (0.659–1.154) | 1.730 (1.635–1.934) | 1.286 (0.772–1.766) | 1.021 (0.188–1.311) |
| $Al_{tot}$ | 6.405 (5.285–7.041) | 7.001 (6.641–7.343) | 6.249 (6.074–6.613) | 6.570 (6.205–6.845) | 5.847 (5.054–6.580) | 5.300 (4.250–7.508) |
| *fe* | 0.58 (0.24–0.75) | 0.65 (0.47–0.87) | 0.70 (0.60–0.78) | 0.31 (0.27–0.37) | 0.60 (0.36–0.77) | 0.73 (0.63–0.90) |
| *ca* | 0.31 (0.04–0.66) | 0.20 (0.06–0.25) | 0.15 (0.09–0.27) | 0.18 (0.10–0.29) | 0.28 (0.12–0.41) | 0.21 (0.10–0.33) |
| *vac* | 0.35 (0.16–0.52) | 0.46 (0.35–0.60) | 0.33 (0.24–0.49) | 0.31 (0.25–0.37) | 0.17 (0.12–0.32) | 0.17 (0.07–0.57) |

Note: bdl – below detection limits by the electron micrpoprobe. *fe* = Fe/(Fe + Mg), *ca* = Ca/(Ca + Na), *vac* = X-vacancy/(X-vacancy + Na). The range of content is given in parentheses.

Примечание: bdl (н.п.о.) – ниже предела обнаружения электронно-зондовым методом; *fe* = Fe/(Fe + Mg), *ca* = Ca/(Ca + Na), *vac* = X-вакансия/(X-вакансия + Na). В скобках приведены пределы содержания.

age 15 kV, current intensity 30 ± 0.1 nA. XPP corrections were used for the correction procedure (INCA program, version 17a). The profile lines of characteristic X radiation are optimized and normalized using natural silicate standards [11].

Tourmalines formulas were calculated on the basis 15 cations, excluding Na, Ca, and K, which implies the absence of vacancies at tetrahedral and octahedral sites and a small amount of Li [12]. The amounts of $OH^-$ and $O^2$– at sites *V* and *W* are estimated from the charge balance constraints. It is assumed that oxygen ions $O^{2-}$ preferably occupies position *W* along with $F^-$ ions [1]. The vacancy rate (□) in the *X* position is calculated by the stoichiometric ratio based on the equation 1 = Na + Ca + K + □. The $B_2O_3$ content is also calculated by stoichiometry. The muscovite formula is calculated for 22 negative charges.

## Results

Samples of tourmaline were selected within prospecting sites of Zamanchivy (sam. MN-2, MN-4, MN-7) located in the continuation of the ore body Valunistoe and Kulibinsky (MN-33). The sites are situated in the eastern and western flanks of the ore field, respectively. Samples were taken from pit bings and rock outcrops.

Tourmaline-bearing formations of the Zamanchivy site are pegmatoids with tourmaline bunches (MN-2), tourmaline-muscovite-quartz veinlets in hydrothermally altered sandstones (MN-4), and quartz breccia with tourmaline cement (MN-7).

Pegmatoids (sample MN-2) are massive large-crystalline muscovite-quartz-feldspar rocks with tourmaline bunches. The size of the last ones is 2–5 mm.

Tourmaline assemblages interstices between quartz grains and cracks in them and forms relatively large crystals of up to several mm in size (Fig. 1a). It is pleochroic; from light mossy or mossy to dark mossy color. Optical zoning is very weak. Tourmaline crystals are sometimes brecciated and exhibit complex zoning in chemical composition. Rare sectors in the central part of such crystals are enriched in Ca (0.44–0.62 apfu) and Fe (1.75–2.48 apfu) (Fig. 1b, c). In addition, calculations show that the content of $Fe^{3+}$ in them is 0.23-0.27 apfu. Other sectors in the central part of crystals have a lower Ca content (0.05–0.16 apfu) and contain less Fe (1.45–1.54 apfu).

The crystal rims have a composition close to the low-calcium sectors in the central part differing slightly in Fe content (1.70 apfu). It is impossible to calculate $Fe^{3+}$ concentration in them and in low-calcium sectors. A special feature of tourmaline is a fairly high Zn (up to 0.12 wt.% ZnO); there are other impurities such as Mn (up to 0.50 wt.% MnO) and Ti (up to 1.0 wt.% $TiO_2$) (Table 1).

In the triangular diagram in terms of X-vacancy – Ca – Na (+ K) (Fig. 2a), the tourmaline compositions fall into all three fields; taking into account Fe and Mg contents, it makes it possible to attribute these compositions to feruvite, schorl and foitite. On the other hand, the determination of the content of ferric iron can change classification.

The charge[1] versus Mg + Fe + $^{X}$□ plot (Fig. 2c) shows that $Fe^{3+}$ ↔Al substitution is exhibited in feruvite, while Al + $O^{2-}$ ↔ R + $OH^-$ in schorl and foitite, where R = $Fe^{2+}$, Mg. In the diagram in coordinates (X-vacancy – Al coordinates (Fig. 2e)), imaging points of feruvite compositions are located along the vector $FeAl_{-1}$, and the composition points of the schorl and foitite are almost parallel to the vector □Al $(NaR)_{-1}$ (R = $Fe^{2+}$, Mg), corresponding to substitutions $Fe^{3+}$ ↔ Al and $^{X}$□ + Al ↔ Na + $R^{2+}$, respectively.

*White mica* together with albite builds up intersecting veinlets up to several hundred microns in thickness in potassium feldspar (Fig. 1d–e). Chemically, mica refers to muscovite (Table 2, 1–4). The Fe and Mg contents range from 0.16 to 0.25 a.f. and from 0.07 to 0.12 apfu, respectively. It can be seen from these data that the described mica differs from muscovite from sample MN-4 by a significantly higher Fe concentration and a slightly lower Mg grade. Muscovite from sample MN-2 does not contain F.

[1]Excess charge is the difference between the sum of the charges of cations at sites X, Y, Z, T and B and the sum of negative charges equal to 58.

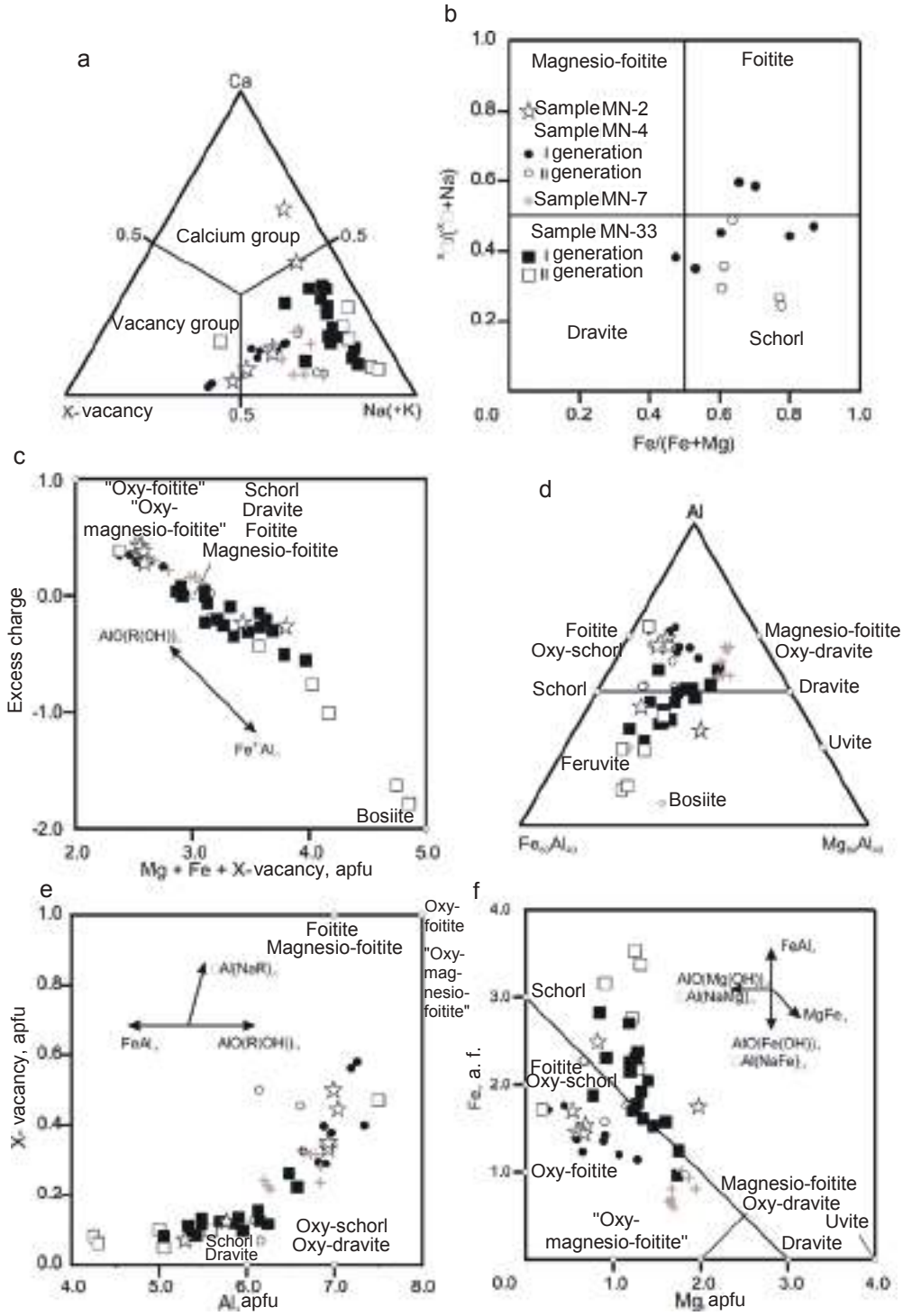



**Figure 2. Triangular (a, d) and binary (b, c, e) diagrams showing compositions from the Zamanchivy and Kulibinsky sites of Mnogovershinny ore field, Khabarovsk Krai.** (a) X-vacancy – Ca–Na (+ K), (b) $Fe_{total}/(Fe_{total} + Mg)$ – X-vacancy/(X-vacancy + Na), (c) Mg + Fe + X-vacancy – excess charge, (d) Fe-Al-Mg, (e) Al–X-vacancy, (f) Mg–Fe.

**Рисунок 2. Треугольные (а, г) и бинарные (б, в, д) диаграммы, иллюстрирующие составы турмалинов участков Заманчивый и Кулибинский Многовершинного рудного поля, Хабаровский край.** а – X-вакансия–Ca–Na (+K); б – $Fe_{общ}/(Fe_{общ} + Mg)$ – X-вакансия/(X-вакансия + Na); в – Mg + Fe + X-вакансия – избыточный заряд; г – Fe–Al–Mg; д – Al–X-вакансия; е – Mg–Fe.

Tourmaline-muscovite-quartz veinlet in hydrothermally altered sandstones (sam. MN-4).

*Tourmaline* occurs as relatively large crystals with a thickness of 1–5 mm and a length of up to 12 mm, the fractures in which are healed with later tourmaline (Fig. 3a–c). The crystals are pleochroic from light orange to dark orange. The BSE images of such crystals show slightly osscillatory zoning (Fig. 3c, d) due to variable Fe and Mg contents (Fig. 1a, b, d; Table 1). Chemically, large crystals belong to the vacancy and alkali series (Fig. 2a). The Fe/(Fe + Mg) versus $^{X}\square$/ ($^{X}\square$ + Na) diagram (Fig. 2b) shows that tourmalines are classified as foitite and schorl; just one composition – to dravite. The relationship between schorl and foitite is unclear. Foitite is characterized by its Fe/(Fe+Mg) value 0.65–0.70; it contains 0.02–0.04 apfu Ti; Ca concentration is 0.03–0.04 apfu.The Fe/(Fe+Mg) value of schorl varies from 0.53 to 0.86.

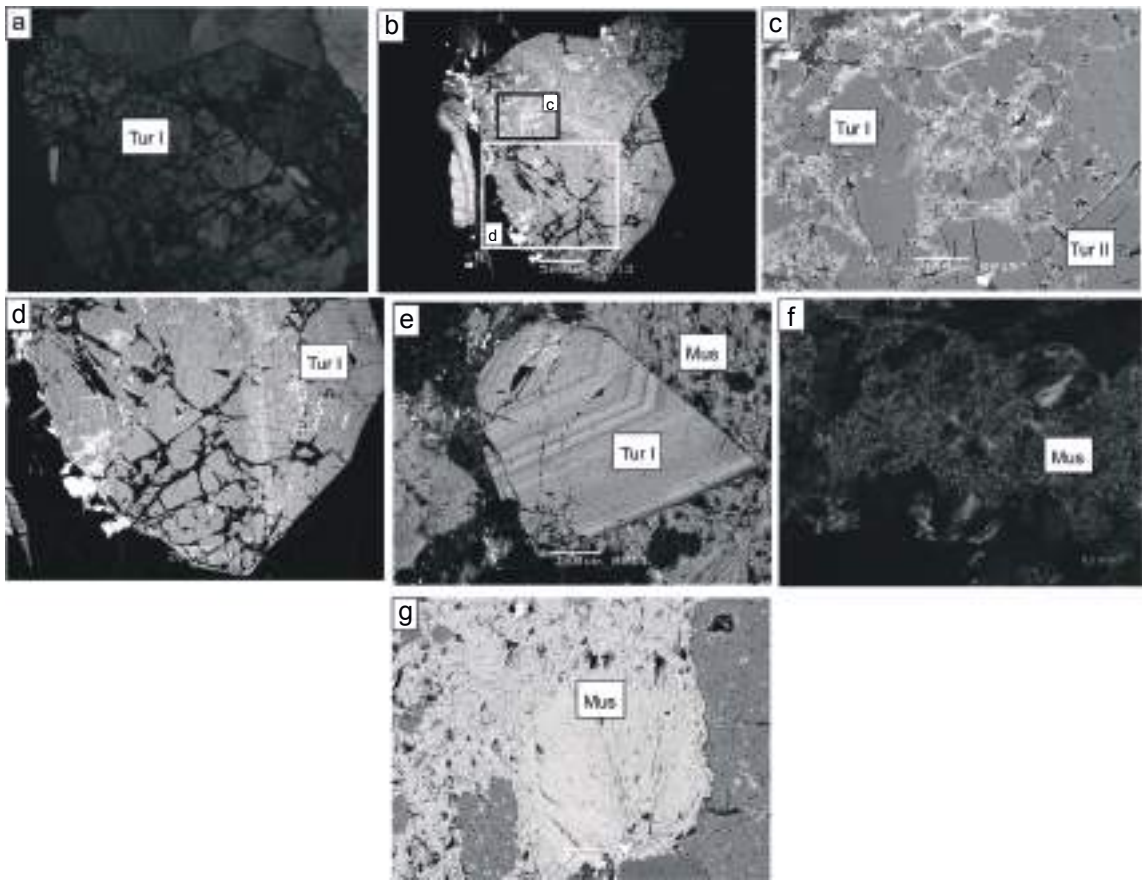



**Figure 3. Large tourmaline crystals and muscovite separation. a** – early tourmaline; **b** – view of foitite crystal; **c** – scaled-up fragment **b** showing that the crystal in the cracks is replaced by a later, more ferrous tourmaline; **d** – scaled-up fragment **b**; **e** – early schorl crystal with rhythmic zonality; **e, g** – muscovite separation. The Zamanchivy site, MN-4 sample. Photo: **a, f** – in the incident light, nicols are crossed, **b–e, g** – in back scattered electrons.

**Рисунок 3. Крупные кристаллы турмалина и выделения мусковита. a** – ранний турмалин; **b** – общий вид кристалла фойтита; **c** – увеличенный фрагмент **b**, показывающий, что кристалл по трещинам замещается поздним, более железистым турмалином; **d** – увеличенный фрагмент **b**; **e** – кристалл раннего шерла с ритмичной зональностью; **e, g** – выделения мусковита. Участок Заманчивый, образец МН-4. Фото. **a, f** – в проходящем свете, николи скрещены, **b–e, g** – в отраженных электронах.

Similar to pegmatoids, the described schorl is enriched in Zn (up to 0.17 wt.% ZnO). The Mn concentration (up to 0.33 wt.% MnO) and Ti (up to 1.2 wt.% $TiO_2$) in schorl and foitite (Table 1) is also comparable. The calculated formulas of foitite and veinlet schorl turned out to be balanced in charge; therefore, it is impossible to estimate $Fe^{3+}$ content in these minerals using calculations.

Blue-green tourmaline, which heals the fractures, can be considered as a second-generation tourmaline. Alongside, quartz and carbonate are found in the cracks. Chemically, tourmaline falls into the alkali field (Fig. 2a). The diagram (Fig. 2b) shows that the mineral is classified as schorl. Its iron content varies from 0.60 to 0.78; it contains 0.03–0.12 apfu Ti and 0.07–0.21 apfu. Ca (Table 1). Calculations indicate that tourmaline II is enriched in $Fe^{3+}$ (up to 0.19 a.f.) compared with earlier schorl and foitite. This may indicate more oxiditive conditions of its formation.

The plot excess charge versus Mg + Fe + $^{X}\square$ (Fig. 2c) indicates substitution Al + $O^{2-}$ ↔ R + $OH^{-}$ (R = $Fe^{2+}$, Mg) in the early schorl and foitite whereas late schorl demonstrates $Fe^{3+}$ ↔ Al substitution.

For early tourmaline, a significant negative correlation was established between the pairs of NaMg and $^{X}\square$Al (r = –0.84) and between Fe and Mg (r = –0.82). This fact shows that the leading types of substitutions in the early schorl and foitite are $^{X}$Na + Mg ↔ $^{X}\square$ + Al and Fe Mg with the minor substitution Al + $O^{2-}$ ↔ R + $OH^{-}$, which is reflected in the diagrams shown in Fig. 2e, f.

*White mica* composes colorless separations of two types differing in size: rosettes with a diameter up to several tenths of mm and small scales which rosettes are coated with (Fig. 3f, g) and replace primary plagioclase and potassium feldspar. Chemically, mica refers to muscovite (Table 2, an. 5–8). The Fe and Mg concentrations range from 0.07 to 0.09 apfu and from 0.10 to 0.15 apfu, respectively. Muscovite does not contain F.

Breccia with muscovite-tourmaline cement (sam. MN-7). The rock is composed of fragments of vein quartz, which are cemented by tourmaline and a small amount of white mica. The size of fragments of quartz is up to several cm.

*Tourmaline* is represented by small crystals of several dozens of microns (Fig. 4), which are pleochroic from light green to green. The BSE images show that the crystals are weakly zoned (Fig. 4a). The content of Fe in the mineral is low (0.61–1.03 apfu); Ca content is also low (0.07–0.21 apfu). Tourmaline contains minor Mn (up to 0.01 apfu); Ti concentration ranges from 0.02 to 0.09 apfu (Table 1). In the triangular diagram in terms of X-vacancy – Ca–Na (+ K) (Fig. 2a), the compositions fall in the alkali field; together with the results of calculation of the formulas, it makes it possible to refer the described tourmaline to dravite. The calculated formulas of dravite turned out to be balanced in charge; therefore, it is impossible to estimate $Fe^{3+}$ content in the mineral by means of calculations.

**Table 2. Chemical composition of muscovite (in wt.%) of the rocks of the Mnogovershinnoe ore deposit.**
**Таблица 2. Химический состав мусковита (в мас. %) пород Многовершинного рудного поля.**

| No | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $SiO_2$ | 47.76 | 48.00 | 46.28 | 46.75 | 47.75 | 47.25 | 48.16 | 46.47 | 46.59 | 47.25 |
| $TiO_2$ | bdl | bdl | 0.22 | 0.13 | bdl | 0.12 | bdl | bdl | 0.44 | 0.13 |
| $V_2O_3$ | bdl | 0.08 | bdl | bdl | bdl | bdl | bdl | bdl | bdl | bdl |
| $Al_2O_3$ | 35.37 | 34.92 | 32.11 | 33.16 | 35.77 | 36.06 | 35.59 | 36.92 | 37.21 | 36.64 |
| MnO | bdl | bdl | 0.06 | l.d.l. | bdl | 0.10 | bdl | bdl | bdl | bdl |
| $FeO_{gen}$ | 3.16 | 2.99 | 4.34 | 3.27 | 1.46 | 1.64 | 1.34 | 1.27 | 2.10 | 3.41 |
| MgO | 0.70 | 0.76 | 1.14 | 0.99 | 1.36 | 1.58 | 1.39 | 0.98 | 0.95 | 0.56 |
| CaO | bdl | bdl | bdl | bdl | bdl | l.d.l. | 0.07 | bdl | 0.05 | 0.20 |
| $K_2O$ | 10.63 | 10.62 | 10.78 | 10.48 | 10.43 | 10.56 | 10.49 | 10.82 | 11.31 | 9.94 |
| $Na_2O$ | 0.20 | 0.21 | 0.24 | 0.14 | 0.19 | 0.33 | 0.21 | 0.22 | 0.32 | bdl |
| $H_2O$ | 4.59 | 4.59 | 4.42 | 4.45 | 4.60 | 4.61 | 4.61 | 4.57 | 4.64 | 4.62 |
| Total | 102.41 | 102.17 | 99.59 | 99.37 | 101.56 | 102.25 | 101.86 | 101.25 | 103.69 | 102.75 |
| *The formula is calculated for 22 negative charges* | | | | | | | | | | |
| Si | 3.114 | 3.134 | 3.139 | 3.148 | 3.111 | 3.070 | 3.126 | 3.045 | 3.007 | 3.060 |
| $^{T}Al$ | 0.886 | 0.866 | 0.861 | 0.852 | 0.889 | 0.930 | 0.874 | 0.955 | 0.993 | 0.940 |
| $^{O}Al$ | 1.858 | 1.831 | 1.850 | 1.897 | 1.832 | 1.822 | 1.707 | 1.780 | 1.858 | 1.839 |
| Mg | 0.068 | 0.074 | 0.115 | 0.099 | 0.132 | 0.153 | 0.135 | 0.096 | 0.091 | 0.054 |
| Ti | 0.000 | – | 0.011 | 0.007 | – | 0.006 | – | – | 0.021 | 0.006 |
| Fe | 0.172 | 0.163 | 0.246 | 0.184 | 0.080 | 0.089 | 0.073 | 0.070 | 0.113 | 0.185 |
| V | – | 0.004 | – | – | – | – | – | – | – | – |
| Mn | – | – | 0.003 | – | – | 0.006 | – | – | – | – |
| K | 0.884 | 0.885 | 0.933 | 0.900 | 0.867 | 0.875 | 0.869 | 0.905 | 0.931 | 0.821 |
| Na | 0.025 | 0.027 | 0.032 | 0.018 | 0.024 | 0.042 | 0.026 | 0.028 | 0.040 | 0.000 |
| Ca | – | – | – | – | – | – | – | – | 0.003 | 0.014 |
| $OH^-$ | 2.000 | 2.000 | 2.000 | 2.000 | 2.000 | 2.000 | 2.000 | 2.000 | 2.000 | 2.000 |
| $Al_{gen}$ | 2.718 | 2.688 | 2.567 | 2.632 | 2.747 | 2.762 | 2.723 | 2.852 | 2.831 | 2.797 |
| *fe* | 0.717 | 0.688 | 0.681 | 0.650 | 0.376 | 0.368 | 0.351 | 0.421 | 0.554 | 0.774 |

Note: An. 1–4 – sam. MN-2, an. 5–8 – sam. MT-4, an. 9 – sam. MN-7, an. 10 – sam. MN-33. bdl – below detection limits by the electron micrpoprobe. *fe* = Fe/(Fe + Mg). $H_2O$ grade is calculated using stoichiometry.
Примечание: ан. 1–4 – обр. МН-2, ан. 5–8 – обр. МН-4, ан. 9 – обр. МН-7, ан. 10 – обр. МН-33; bdl (н.п.о.) – ниже предела обнаружения электронно-зондовым методом; *fe* = Fe/(Fe + Mg). Содержание $H_2O$ рассчитано по стехиометрии.

of calculations. The location of compositions on the triangular diagram in terms of Fe–Al– Mg (Fig. 2d) above schorl-dravite line indirectly indicate the Fe low content.

The excess charge versus Mg + Fe + X-vacancy plot (Fig. 2c) indicates that the chemical substitution of $Al + O^{2-} \leftrightarrow R + OH^-$ is exposed in dravite, where $R = Fe^{2+}$, Mg.

*White mica* forms aggregates of small scales between tourmaline crystals (Fig. 4b). Chemically, mica refers to muscovite (Table 2, an. 9). The Fe and Mg contents are 0.11 and 0.09 apfu, respectively.

Tourmaline-bearing assemblages of the Kulibinsky site are quartz-tourmaline metasomatites (sample MN-33); it appears to form a linear zone in volcanic rocks. Metasomatites are dissected by veinlets of late quartz with 1–4 cm thick. The veinlets are composed of coarse-grained parallel-columnar quartz, the color of which varies from lacteous to lilaceous.

*Tourmaline* forms dense, almost monomineralic aggregates of acicular crystals and is represented by two generations. The first generation tourmaline is composed of relatively large, complexly zoned crystals ranging in size from 100 μm to a few mm (Fig. 5a, b). It contains fine inclusions of W-bearing rutile and REE phosphates. The second generation tourmaline is represented by small individual crystals up to 20 μm in diameter (Fig. 5b, c); as an aggregate of split crystals, it molds on tourmaline I (Fig. 5d) or forms the outer zones on tourmaline crystals of the first generation (Fig. 5b).

Large crystals of tourmaline-I are pleochroic from brown or dark blue to black. The BSE images (Fig. 5a, b) show their complex zonality due to the variable Fe content. Zonality is especially well exhibited along the long axis (Fig. 5a). Crystallization begins with the formation of Fe-rich tourmaline (Fe/(Fe + Mg) 0.55–0.77 (Table 1). Then ferriferous acquires a rhythmic character varying in wide range from 0.41 to 0.71. Chemically, tourmaline-I is confined to the alkali series (Fig. 2a) and can be referred to schorl, but composition – to dravite. However, it should be noted that establishing the concentration of $Fe^{3+}$ in the mineral can

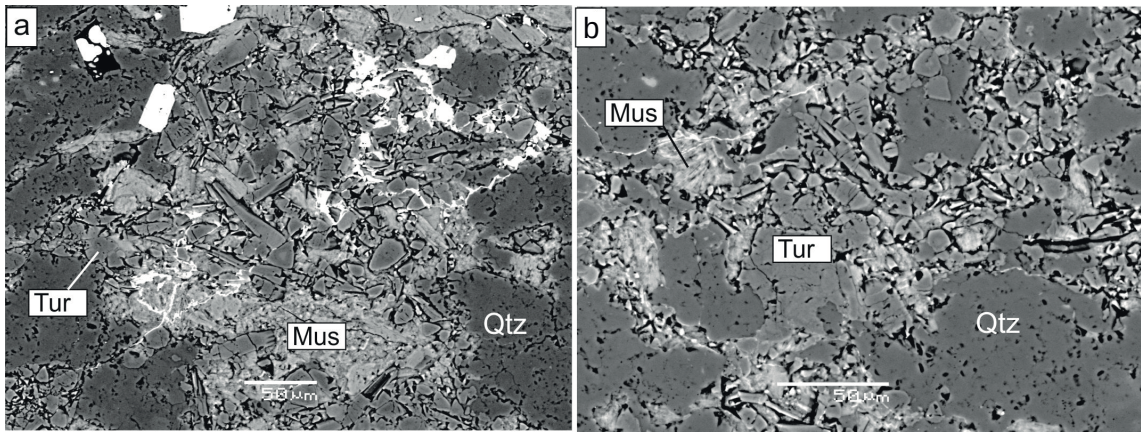



**Figure 4. Muscovite-tourmaline aggregate cementing brecciated quartz crystals. The photo "a" shows small zonal crystals of tourmaline. The Zamanchivy site, MN-7 sample. Photo in back scattered electrons.**

**Рисунок 4. Мусковит-турмалиновый агрегат, цементирующий брекчированные кристаллы кварца. На фото «а» видны мелкие зональные кристаллы турмалина. Участок Заманчивый, образец МН-7. Фото в отраженных электронах.**

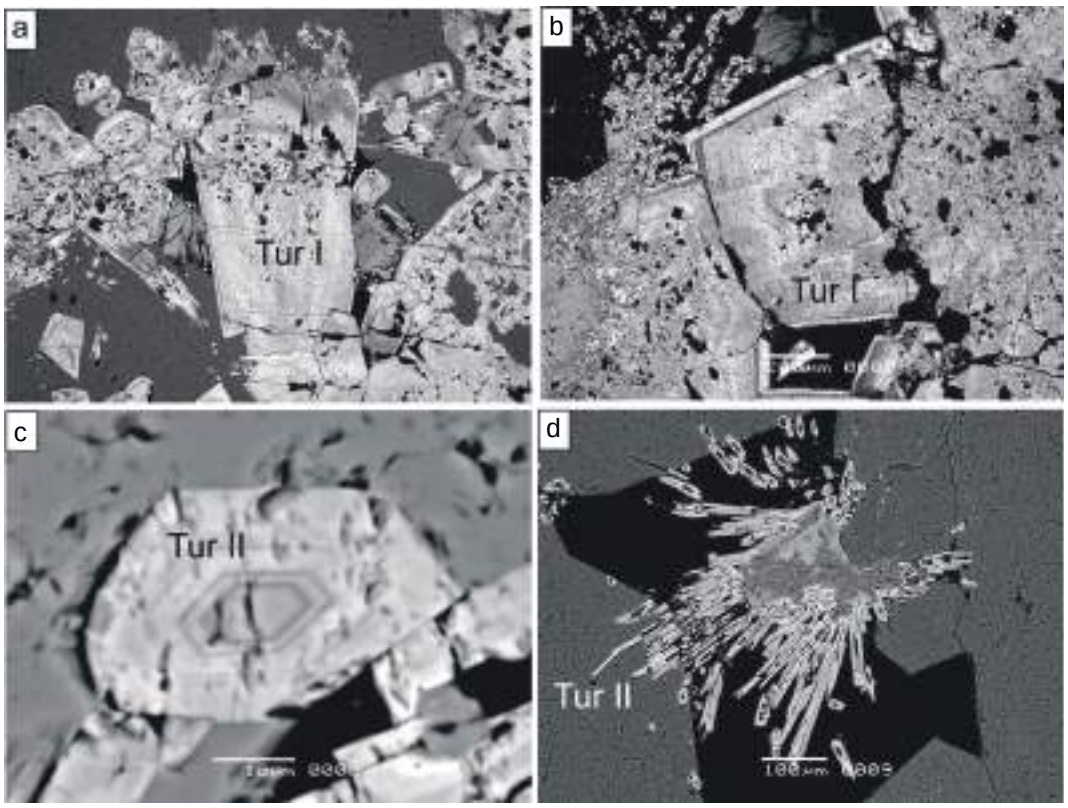



**Figure 5. Two generations of tourmaline crystals of quartz-tourmaline metasomatites.** a, b – relatively large, complex and zonal tourmaline-I crystals. Their growth, in general, occurred with a decrease in ferrous; tourmaline contains growths of W-bearing rutile and REE phosphates; c – small zonal tourmaline-II crystal; d – aggregate of split tourmaline-II crystals molds on zonal tourmaline-I. The Kulibinsky site, MN-33 sample. Photo in back scattered electrons.

**Рисунок 5. Две генерации кристаллов турмалина кварц-турмалиновых метасоматитов.** a, b – относительно крупные, сложно-зональные кристаллы турмалина-I, рост которых в целом происходил с уменьшением железистости, турмалин содержит вростки W-содержащего рутила и фосфатов РЗЭ; c – мелкий зональный кристалл турмалина-II; d – агрегат расщепленных кристаллов турмалина-II нарастает на зональный турмалин-I. Участок Кулибинский, образец МН-33. Фото в отраженных электронах.

change its classification. Schorl contains up to 0.16 apfu Ti; Ca concentration is 0.10–0.37 apfu. The Mn content in most compositions is less-than-detection limits; sometimes, it is 0.01–0.02 apfu.

Second-generation tourmaline crystals are also pleochroic from brown or dark blue to black. In contrast to the first-generation schorl crystals, they have the usual growth zonality with a darker central part and a lighter outer zone (Fig. 5b, c). The central parts of crystals are composed of foitite, the edge parts can be confined to schorl. However, establishing the concentration of $Fe^{3+}$ in the mineral can change its classification. Such a change is more likely to take place because the tourmaline edge zones are characterized by a significant deficit of positive charges (when calculating a formula for 15 cations, where iron is considered as ferrous). The calculated amount of $Fe^{3+}$ in the edge zones of tourmaline-II crystals is 0.43–1.78 apfu. In the diagram in terms of

of the excess charge – Mg + Fe + $^{X}\square\square$ (Fig. 2c), two imaging points of compositions are located near the bosiite point, tourmaline with the ideal formula $NaFe^{3+}_3$ ($Mg_2Al_4$) [$Si_6O_{18}$] ($BO_3$) $(OH)_3O$ [13].

The same graph as well as diagrams in Fig. 2c, e, g show that tourmaline of both generations is characterized by substitution of $Fe^{3+} \leftrightarrow Al$. Indirectly, the location of a number of imaging composition points below schorl-dravite line on the triangular diagram in terms of Fe–Al–Mg (Fig. 2d) indicate the enrichment of $Fe^{3+}$ tourmaline.

*White mica* composes colorless scales of several hundred microns in size. Chemically, it refers to muscovite (Table 2, an. 10). The Fe and Mg contents are 0.18 and 0.05 apfu, respectively. Muscovite does not contain F.

## Discussion

The obtained data show that tourmalines of the Mnogovershinnoe deposit differ in their chemical composition and type of substitution. All studied tourmalines by these parameters can be divided into two groups.

Group 1 includes schorl, foitite and pegmatoids feruvite (sam. MN-2), as well as schorl and foitite of the first generation, tourmaline-muscovite-quartz veinlet in sandstones (sam. MN-4). Group 2 includes the second generation schorl, tourmaline-muscovite-quartz veinel (sam. MN-4), schorl and foitite of quartz-tourmaline metasomatites (sam. MN-33) and dravite of quartz breccia cement (sam. MN-7).

For tourmaline of the first group, substitutions Fe ↔ Mg and X-vacancy + Al ↔ Na + $R^2$ + are common, with the secondary role of replacing Al + $O^{2-} \leftrightarrow R^{2+}$+ $OH^-$, except for single sectors of crystals enriched in Ca. One more fact that allows us to combine these tourmalines is the increased Zn and Mn content compared with group 2. The large size of quartz-muscovite veinlets of tourmaline-I crystals in sandstones and the chemical composition identical to tourmaline of pegmatoids implies that these veinlets are pegmatoids as well. The charge-balanced chemical formulas of tourmaline do not even allow an approximate estimate the ratio of $Fe^{3+}/Fe_{total}$ in tourmaline, which indicates a low $Fe^{3+}$ grade in the mineral or its absence. In turn, this indicates reducing or slightly oxidative conditions for the formation of tourmaline and pegmatoids in general. According to [14], the ratio $Fe^{3+}/Fe_{tot}$ in tourmaline of pegmatites is 0.05–0.22.

For tourmaline of the second group, substitutions $Fe^{3+} \leftrightarrow Al$ and Al + $O^{2-} \leftrightarrow R^{2+}$+ $OH^-$ are common, which is typical of tourmalines from porphyry-style deposits [15]. The formulas of tourmalines of quartz-tourmaline metasomatites calculated using the electron probe analysis are not balanced in charges, which makes it possible to approximately estimate the ratio $Fe^{3+}/Fe_{tot}$. In tourmaline of quartz-tourmaline metasomatites, it varies from 0.01 to 0.48 indicating the enrichment of $Fe^{3+}$ in a number of compositions and the increased oxidative potential of mineral formation environment. The location of points below the line of schorl-dravite on a triangular diagram (Fig. 2d) indirectly indicates the enrichment of tourmaline compounds with ferric iron. The calculated ratio $Fe^{3+}/Fe_{total}$ in tourmaline-II quartz veinlets in sandstones and tourmaline cement quartz breccia does not exceed 0.08 giving evidence of more reducing conditions of formation than in the case of quartz-tourmaline metasomatites. The imaging points of these tourmalines are located above the schorl-dravite line on the triangular diagram indirectly indicating a low content of $Fe^{3+}$ in minerals. The obtained data suggest that the formation of tourmaline of the second group took place against the background of a decrease in the oxidative potential of the mineral formation environment.

## Conclusion

Tourmalines of the post-ore mineral associations of the Mnogovershinnoe gold deposit are divided into two groups characterized by different chemical composition and substitutions. Tourmalines of the first group with substitutions Fe ↔ Mg and X-vacancy + Al ↔ Na + $R^{2+}$ are confined to pegmatoids and were formed in reductive or slightly oxidative conditions. Later tourmalines of the second group with substitutions $Fe^{3+} \leftrightarrow Al$ and Al + $O^{2-} \leftrightarrow R^{2+}$+ $OH^-$ indicate the possible presence of mineralization of the porphyry type and the formation of a mineralization while reducing the oxidation potential of mineral formation environment.

## Acknowledgments

The authors are grateful to N. N. Koshlyakova for her assistance in electron microprobe study.

## REFERENCES

1. Henry D. J., Novák M., Hawthorne F. C., Ertl A., Dutrow B. L., Uher P., Pezzotta F. 2011, Nomenclature of the tourmaline-supergroup minerals. *American Mineralogist*, vol. 96, pp. 895–913. https://doi.org/10.2138/am.2011.3636
2. Kuzmin V. I., Dobrovolskaya N. V., Solntseva L. S. 1979, *Turmalin i yego ispol'zovaniye pri poiskovo-otsenochnykh rabotakh* [Tourmaline and its use in prospecting]. Moscow, 272 p.
3. Collins A. C. 2010, Mineralogy and geochemistry of tourmaline in contrasting hydrothermal systems: Copiapó area, Northern Chile. Unpub. Master thesis, Univ. Arizona, 225 p.
4. Slack J. F. 1996, Tourmaline associations with hydrothermal ore deposits. *Reviews in Mineralogy*, vol. 33, pp. 559–643.
5. Moiseenko V. G., Eyrish L. G. 1996, *Zolotorudnyye mestorozhdeniya vostoka Rossii* [Gold deposits of the east of Russia]. Vladivostok, 360 p.
6. Ratkin V. V. 1995, Pre- and postaccretionary metallogeny of the Southern Russian Far East. *Resource Geology*, no 18, pp. 127–133. https://doi.org/10.1127/0935-1221/2012/0024-2241
7. Nokleberg W. J. 2010, Metallogenesis and tectonics of the Russian Far East, Alaska, and the Canadian Cordillera. U.S. Geological Survey, 397 p.
8. Kazarinov A. I., Mikhailova M. S. 1970, Relationships of gold and gold-silver mineralization with propylites, secondary quartzites and quartz metasomatites (using the group of subvolcanic deposits of the East of the USSR as an example). *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo instituta* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University], vol. 239, pp. 50–54. (*In Russ.*)
9. Konstantinov M. M., Vargunina N. P., Kosovets T. N., Struzhkov S. F., Syngayevskiy E. D., Shishakova L. N. 2000, *Zoloto-serebryanyye mestorozhdeniya* [Gold and silver deposits]. Series: fields models noble and non-ferrous metals. Moscow, 239 p.
10. Ivanov V. V., Zinkov A. V., Taskaev A. V. 1989, *Mineralogiya pozdnepaleogenovykh zoloto-serebryanykh mestorozhdeniy v rayone Nizhnego Amura* [Mineralogy of Late Paleogene gold-silver deposits in the area of Nizhni Amur]. Collection of works: Typical minerals of ore deposits in volcanic belts and zones of activation of northeast Asia. Vladivostok, pp. 87–89.
11. Jarozewich E. 2002, Smitsonian microbeam standards. Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, vol. 107, pp. 681–685. https://dx.doi.org/10.6028/jres.107.054
12. Henry D. J., Kirkland B. L., Kirkland D. W. 1999, Sector-zoned tourmaline from the cap rock of a salt dome. *European Journal of Mineralogy*, vol. 11, pp. 263-280.
13. Ertl A., Baksheev I. A., Giester G., Lengauer C. L., Prokofiev V. Yu., Zorina L. D. 2016, Bosiite, $NaFe^{3+}_3$ $(Al_4Mg_2)(Si_6O_{18})(BO_3)_3(OH)_3O$, a new ferric member of the tourmaline supergroup from the Darasun gold deposit, Transbaikalia, Russia. *European Journal of Mineralogy*, vol. 28, pp. 581–591. https://doi.org/10.1127/ejm/2016/0028-2540

14. Korovushkin V. V., Kuzmin V. I., Belov V. F. 1979, Mössbauer studies of structural features in tourmaline of various genesis. *Physics and Chemistry of Minerals*, vol. 4, pp. 209–220. https://doi.org/10.1007/BF00307945
15. Baksheev I. A., Prokof'ev V. Yu., Zaraisky G. P., Chitalin A. F., Yapaskurt V. O., Nikolaev Y. N., Tikhomirov P. L., Nagornaya E. V., Rogacheva L. I., Gorelikova N. V., Kononov O. V. 2012, Tourmaline as a prospecting guide for the porphyry-style deposits. *European Journal of Mineralogy*, vol. 24, pp. 957–979. https://doi.org/10.1127/0935-1221/2012/0024-2241

*The article was received on December 18, 2018*

УДК 549.612(571.63) https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-1-28-38

# О химизме турмалина из Многовершинного рудного поля (Хабаровский край, Дальний Восток)

**Иван Андреевич БАКШЕЕВ***,
**Евгений Алексеевич ВЛАСОВ****

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Россия, Москва

***Актуальность работы*** обусловлена необходимостью изучения минералогии золоторудных объектов Дальнего Востока, сведения о которых крайне скудны.
***Цель работы:*** исследование химического состава турмалина из Многовершинного рудного поля, Хабаровский край (Дальний Восток).
***Методология исследования:*** химический состав минералов и их изображение были получены с помощью электронного микроскопа Jeol JSM-6480, оборудованного энергодисперсионной приставкой Inca Energy-350 (аналитик Н. Н. Кошлякова, кафедра петрологии МГУ). Условия съемки на электронном микроскопе: ускоряющее напряжение 15 кВ, ток зонда на образце 30 ± 0,1 нА. Для процедуры коррекции использованы XPP поправки (программа «INCA» версия 17a).
***Результаты.*** Полученные данные показывают, что турмалины Многовершинного рудного поля различаются по химическому составу и характеру замещений. Все изученные турмалины по этим параметрам можно разделить на две группы. В группу 1 входят шерл, фойтит и ферувит пегматоидов, а также шерл и фойтит первой генерации турмалин-мусковит-кварцевого прожилка в песчаниках. В группу 2 попадают шерл второй генерации турмалин-мусковит-кварцевого прожилка, шерл и фойтит кварц-турмалиновых метасоматитов и дравит цемента кварцевой брекчии.
***Выводы.*** Турмалины послерудных минеральных ассоциаций Многовершинного золоторудного месторождения делятся на две группы, характеризующиеся разным химическим составом и замещениями. Турмалины первой группы с замещениями Fe ↔ Mg и X-вакансия + Al ↔ Na + $R^{2+}$ относятся к пегматоидам и формировались в восстановительных или слабоокислительных условиях. Более поздние турмалины второй группы с замещениями $Fe^{3+}$ ↔ Al и Al + $O^{2-}$ ↔ $R^{2+}$ + $OH^-$ указывают на возможное наличие минерализации порфирового типа и формирование при снижении окислительного потенциала среды минералообразования.

*Ключевые слова:* турмалин, химический состав, метасоматиты, Многовершинное рудное поле, Хабаровский край, Дальний Восток.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Henry D. J., Novák M., Hawthorne F. C., Ertl A., Dutrow B. L., Uher P., Pezzotta F. Nomenclature of the tourmaline-supergroup minerals // American Mineralogist. 2011. Vol. 96. P. 895–913. https://doi.org/10.2138/am.2011.3636
2. Кузьмин В. И., Добровольская Н. В., Солнцева Л. С. Турмалин и его использование при поисково-оценочных работах. М.: Недра, 1979. 272 с.
3.Collins A. C. Mineralogy and geochemistry of tourmaline in contrasting hydrothermal systems: Copiapó area, Northern Chile. Unpub. Master thesis, Univ. Arizona, 2010. 225 p.
4. Slack J. F. Tourmaline associations with hydrothermal ore deposits // Reviews in Mineralogy. 1996. Vol. 33. P. 559–643.
5. Моисеенко В. Г., Эйриш Л. Г. Золоторудные месторождения Востока России. Владивосток: Дальнаука, 1996. 360 с.
6. Ratkin V. V. Pre- and post-accretionary metallogeny of the Southern Russian Far East // Resource Geology. 1995. № 18. P. 127–133. https://doi.org/10.1127/0935-1221/2012/0024-2241
7. Nokleberg W. J. Metallogenesis and tectonics of the Russian Far East, Alaska, and the Canadian Cordillera. Reston, Virginia, United States. U. S. Geological Survey. 2010. 397 p.
8. Казаринов А. И., Михайлова М. С. Взаимоотношения золотого и золото-серебряного оруденения с пропилитами, вторичными кварцитами и кварцевыми метасоматитами (на примере группы субвулканических месторождений Востока СССР // Изв. ТПИ. 1970. Т. 239. С. 50–54.
9. Константинов М. М., Варгунина Н. П., Косовец Т. Н., Стружков С. Ф., Сынгаевский Е. Д., Шишакова Л. Н. Золото-серебряные месторождения. Сер. «Модели месторождений благородных и цветных металлов». М.: ЦНИГРИ, 2000. 239 с.
10. Иванов В. В., Зиньков А. В., Таскаев А. В. Минералогия позднепалеогеновых золото-серебряных месторождений в районе Нижнего Амура // Типовые минералы рудных месторождений в вулканических поясах и зонах активизации Северо-Восточной Азии. Владивосток: ДВГИ АН СССР, 1989. С. 87–89.
11. Jarozewich E. Smitsonian microbeam standards // Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology. 2002. Vol. 107. P. 681–685. https://dx.doi.org/10.6028/jres.107.054
12. Henry D. J., Kirkland B. L., Kirkland D. W. Sector-zoned tourmaline from the cap rock of a salt dome // European Journal of Mineralogy. 1999. Vol. 11. P. 263–280.
13. Ertl A., Baksheev I. A., Giester G., Lengauer C. L., Prokofiev V. Yu., Zorina L. D. Bosiite, $NaFe^{3+}_3(Al_4Mg_2)(Si_6O_{18})(BO_3)_3(OH)_3O$, a new ferric member of the tourmaline supergroup from the Darasun gold deposit, Transbaikalia, Russia // European Journal of Mineralogy. 2016. Vol. 28. P. 581–591. https://doi.org/10.1127/ejm/2016/0028-2540
14. Korovushkin V. V., Kuzmin V. I., Belov V. F. Mössbauer studies of structural features in tourmaline of various genesis // Physics and Chemistry of Minerals. 1979. Vol. 4. P. 209–220. https://doi.org/10.1007/BF00307945
15. Baksheev I. A., Prokof'ev V. Yu., Zaraisky G. P., Chitalin A. F., Yapaskurt V. O., Nikolaev Y. N., Tikhomirov P. L., Nagornaya E. V., Rogacheva L. I., Gorelikova N. V., Kononov O. V. Tourmaline as a prospecting guide for the porphyry-style deposits // European Journal of Mineralogy. 2012. Vol. 24, № 6. P. 957–979. https://doi.org/10.1127/0935-1221/2012/0024-2241

*Статья поступила в редакцию 18 декабря 2018 г.*

* ✉ baksheev@geol.msu.ru
https://orcid.org/0000-0001-6920-427X
**user420@geol.msu.ru

УДК 550.832.9 https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-1-39-47

# Geophysical criteria for the separation of productive micaceous veins of the Mariinsky emerald-beryllium deposit (the Middle Urals)

**Mikhail Petrovich POPOV**[1, 2*],
**Oleg Petrovich PELESHKO**[3, **],
**Evgeniya Anatol'evna BAZHENOVA**[4, ***],
**Viktor Sergeevich IVANCHENKO**[4, ****],
**Vladimir Vasil'evich BAKHTEREV**[4, *****]

[1]Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia
[2]Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russia
[3]AO Mariinsky rudnik, Asbest, Malysheva, Russia
[4]Institute of Geophysics of the Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russia

***Relevance*** of the work is the development of new methods for rapid extraction (determination) of ore bodies in the underground mine of the field directly. Measurements were carried out both on specially prepared samples in the form of cubes of the same size, and under conditions of natural occurrence.
***Purpose of the work*** is to study the magnetic susceptibility and electrical resistivity of the main host rocks and the ore complex (emerald-bearing glimmerites and quartz-plagioclase veins with beryl) in the most famous Ural emerald-beryllium deposit, the Mariinsky deposit.
***Methodology of research.*** In order to study the magnetic properties of typical rocks and ore bodies of the Mariinsky deposit, the PIMV-M field magnetic susceptibility meter with a measurement range of $1 \cdot 10^{-5}$… 1 SI units was used in the underground mine directly. The relative measurement error does not exceed ± 10% in the range of $10^{-4}$ ... 1 SI units. The measurement was carried out by applying the flat surface of the measuring transducer to the bottomhole wall in a lithologically homogeneous section with subsequent measurement and recording of the obtained value in the field document. To study the electrical resistivity, standard samples in the form of cubes of 24 × 24 × 24 mm were used; their composition was investigated with the help of binocular enhancer MBS-10. The measurements were carried out along three axes since almost all samples have anisotropy. The teraohmmeter E6-13A was used for working.
***Results.*** The data on the magnetic susceptibility and electrical resistance of the main host rocks and the ore complex (emerald-bearing glimmerites and quartz-plagioclase veins with beryl) from the Mariinsky deposit are presented. All data are adjusted with the petrographic characteristics of rocks.
***Conclusions***. Possibility in principle is shown for creating a new express-method for isolating quick micaceous veins in wells and mine faces with the simultaneous measurement of magnetic susceptibility and electrical resistance of rocks during mining operations in an underground mine.

*Keywords:* The Urals, magnetic susceptibility, electrical resistance, glimmerites, quartz-plagioclase veins, emerald-beryllium deposits, Ural emerald mines.

## Introduction

Currently, the Government of Russia entrusts executives of the Malyshevsky (Mariinsky) emerald-beryllium deposit with the task to restore beryllium mining in Russia. During mining operations, a very important factor affecting the cost and quantity of the extracted commercial element is the possibility of isolating and sorting out quick micaceous veins carried out directly in the mine face while blasthole drilling. Earlier during the active mode of operation of the Malyshevsky mine group (1950–1990), the enterprise used the photoneutron method for such tasks [1]. The application of this method is associated with certain managerial difficulties (the use of strong radiation sources, the creation of isotopes storages, and the organization of a special control service). Therefore, at the early stage of geological exploration, geophysical methods are promising, operational, and low-cost methods of searching for quick micacious veins and serpentinite contacts [2–4].

According to early literature data [2], the magnetic susceptibility of highly basic rocks of the Emerald-bearing line of the Urals ranges from 25 ... $63 \cdot 10^{-5}$ to 2520… $5040 \cdot 10^{-5}$ SI units, and in some cases up to 12 600 $\cdot 10^{-5}$ SI units. The increased magnetic properties of ultrabasic rocks are associated with accessory magnetite. Moreover, a considerable heterogeneity of ultrabasic rocks was established according to the magnitude of magnetic susceptibility (Table 1), which is mainly due to their serpentinization, carbonatization, and development of talc. Table 1 shows the magnetic susceptibility values obtained by the authors of the work [2] for rocks typical of the deposit. Unfortunately, the authors did not indicate in their work the way the measurements were made (using samples or under conditions of natural occurrence). However, according to their data, rocks of the basic and acidic composition are mainly non-magnetic; amphibolites, gabbros, granitic rock, and glimmerites are distinguished by reduced magnetic susceptibility.

Additionally, according to literature data [2], the dependence of the specific electrical resistance of ultrabasites on the metamorphism intensity is noted:

– slightly serpentized peridotites – 1210 ... 3900 Ohm · m, ***at an average*** **1900 Ohm · m;**
– serpentinites – 300–960 Ohm · m, ***at an average*** **750 Ohm · m;**
– serpentinite-talc-carbonate rocks – 16 ... 21 Ohm · m, ***at an average*** **18 Ohm · m;**
– talc-carbonate rocks – 2 ... 26 Ohm · m, ***at an average*** **10 Ohm · m.**

* popovm1@yandex.ru
http://orcid.org/0000-0002-0527-8234
** o.peleshko@ambercombine.ru
*** bazenova_jena@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-2068-7140
**** ivanchenko_05@mail.ru
http://orcid.org/0000-0002-1294-6050
***** ugv@bk.ru
http://orcid.org/0000-0002-1174-1301

**Table 1. Characteristics of magnetic susceptibility χ of rocks of the Ural emerald mines** [2].
**Таблица 1. Характеристика магнитной восприимчивости χ горных пород Уральской изумрудоносной полосы [2].**

| Rock | $\chi \cdot 10^{-5}$ SI units | | |
|---|---|---|---|
| | Number of determinations | Measurements range | Average |
| Amphibolites | 3646 | 0…302 | 25 |
| Gabbro | 800 | 0…126 | 35 |
| Diorites | 3370 | 0…2520 | 21…370 |
| Granitic rock | 2375 | 0…630 | 10 |
| Serpentinites | 1226 | 6…10 000 | 1612 |
| Dolerines | 555 | 6…3126 | 831 |
| Chlorite rocks | 135 | 6…1612 | 227 |
| Apoultrabasite glimmerites | 324 | 9…40 | 18…21 |
| Apodiorite glimmerites | 120 | 12…50 | 23…30 |

Micaceous veins are distinguished among the host rocks by high electrical resistance, which is caused by their composition – these are shales, consisting mainly of phlogopite with mica scales oriented along shaliness. According to the data of parametric measurements of samples, the average electrical resistivity is 70 000 Ohm · m, which is significantly higher than the electrical resistance of the host rocks [2]. However, the measurement technique is also not specified in the work.

## The brief geological structure of the Mariinsky emerald-beryllium deposit

The Ural emerald mines are the world-famous ore region, where the largest deposits of beryllium ores and gems are located in Russia: emerald, alexandrite, and phenakite. Gem-stones mining began in 1831 and do not stop until today. Within the Emerald Mines, the only source of beryl is micaceous veins, which are found in the contact of serpentinites in talc-chlorite rocks.

The Mariinskoe (Malyshevskoye) deposit is included in a group of fields that goes under the general name of the Emerald Mines of the Urals. The ore field is attributed to the deposit which is located in the eastern exocontact zone of the large Aduisky granite massif of the late orogenic type. Granites burst a complex of metamorphic and intrusive rocks, which includes: amphibolites and amphibolite schists, carbon-bearing siliceous schists, serpentinized ultrabasites, serpentinites and dolerines derived from them, diorites, quartz diorites and diorite porphyry (Fig. 1).

The contact of the granite massif with a complex of metamorphic and intrusive rocks has the east dip with 65 ... 80 ° angle and is complicated by bends with flat areas and broad warps. The Mariinskoe deposit is confined to one of such downwarps. The ore field is localized in the eastern flank of the anticlinal bend. The main ore-controlling and ore-distributing structures at the deposit are spatially connected fault zones and dikes of diorite porphyrites [6]. Fault zones are fixed by highly foliated and broken dolerines (usually with additions of chlorite, actinolite, and phlogopite); there are lenticular bodies of serpentinites, as well as dikes of diorite porphyrites and separate sheet-like bodies of carbonaceous silicious schists. Most ore bodies are concentrated in the fault zones oriented mainly in the near north-south and lateral directions. In the fault zones and adjacent areas, all rocks are subject to tectonical boudinage and profound metasomatic changes — phlogopitization, fluoritization, and development of talc (serpentinites). In addition, the most intensive formation of beryllium mineralization is observed in fault zones. In the vertical sections, schistosity zones often unite and diverge again; wedging out and bulges are often noted. It was also noted that sometimes separate feathering fractures depart from the main fault zones; large ore shoots are formed in the areas of intersection with faults. Fault zones can be tracked along the strike up to 1200 m, their thickness varies from 5 to 70 m. Dykes of diorite porphyry play an important role in the formation of the structure of the ore field of the deposit. Along the strike and the fall of the ore zone, five largest dykes are observed in accordance with it, the length of which reaches 1150 m with a thickness of 5 to 10 m. Dyke-like bodies are spatially closely associated with the identified large fault zones, and the development of ore-bearing structures occurs precisely here, that is, in the areas of occurrence of dykes that create a profound mechanical heterogeneity of the surrounding formation. The ore zone of the deposit has a southern declination at an angle of 50 °. On the strike, it is tracked for 1 100 m (horizon –30 m), and it has been explored to a depth of 360 ... 500 m [6]. The vein assemblage is represented by emerald-bearing micaceous and beryl-bearing quartz-plagioclase veins (Figure 1).

Micaceous ore bodies are the only carriers of beryllium raw materials. They contain an overwhelming (more than 95%) amount of beryl, which is also characterized by the highest (13.4 g/t) content of this component. Micaceous assemblage found in talc schists is characterized by the highest (16.1 g/t) content of emerald raw materials. They are quite diverse. This diversity is due to different chemical and mineral composition of protoliths, the duration and polygeneration of metasomatic processes. Among the rocks that have undergone metasomatic processing one can mention *apohyperbasite and apodiorite* rocks [7], *apovulcanite and apocarbonate*, *apoamphibolite and apogabbroic rocks*; according to mineral composition of the central zones: Biotite-plagioclase-phlogopite, quartz-plagioclase-phlogopite, topaz-plagioclase-phlogopite, and chrysoberyl-phenacite-phlogopite [5]. Within the ore zones of known deposits of beryl and emerald, micaceous assemblage is accompanied by small veins of talc-carbonate, quartz-epidote, plagioclase, or fluorite composition filling with open cracks.

## Methods of studying the magnetic susceptibility of rocks and objects of study

The study of magnetic susceptibility to differentiate the magnetic properties of natural minerals has been repeatedly used by researchers [8–10]. In order to study the magnetic properties of typical rocks and ore bodies of the Mariinsky deposit, the PIMV-M field magnetic susceptibility meter with a measurement range of $1 \cdot 10^{-5}$… 1 SI units was used in the underground mine directly. Relative measurement error does not exceed ± 10% in the range ($10^{-4}$ ... 1) SI units, in the range ($10^{-5}$ ... $10^{-4}$) SI units is not rated. Measurement was carried out at barings in mine workings (layering crossdrifts, dass, ore drifts) at horizons +15, –30, –120 m. The measurement was carried out by applying the flat surface of the measuring transducer to the bottomhole wall in a lithologically homogeneous section with subsequent measurement and recording of the obtained value in the field document. At

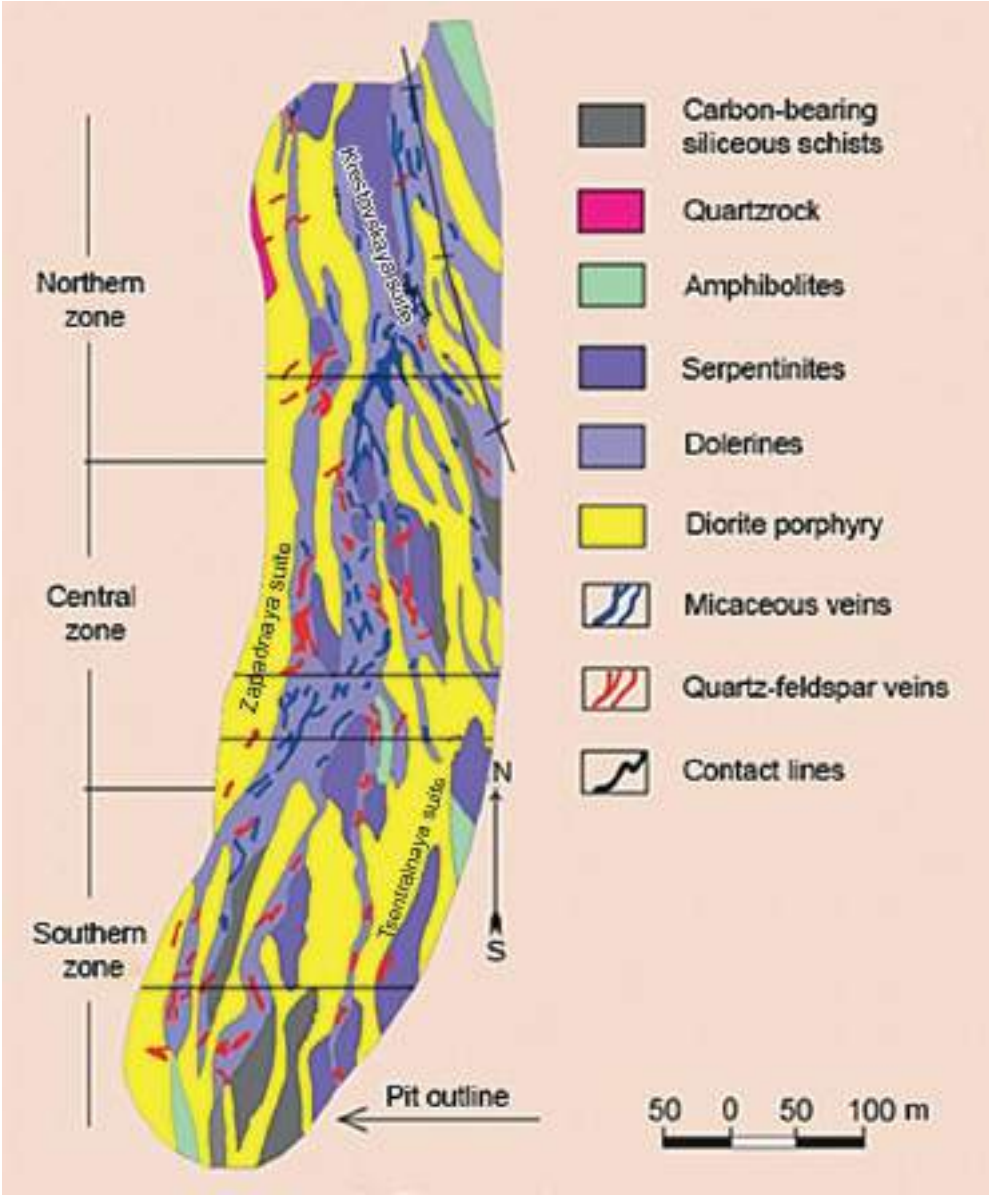



**Figure 1. Geological structure of the Mariinsky Deposit [5].**
**Рисунок 1. Геологическое строение Мариинского месторождения [5].**

the same time, the faces under study were uneven (rough), and the gap between the device and the surface under study was from 0.3 to 0.7 mm, 0.5 mm on average. Since the PIVM-M device measures the apparent magnetic susceptibility $k'$, the transition to the true magnetic susceptibility value $k$ is realized by the formula $k = k' / (1 - 0.5\,k)$. Since all obtained values of apparent magnetic susceptibility are less than 0.1 ($k' \leq 0.1$ SI units), then it was considered to be $k = k'$[11]. Due to irregularities of the face walls, i.e. an "outshot-lobe" difference, as a result of which the gap between the measured surface and the flat surface of a transducer is 0.5 mm on average, the unevenness-correction factor of 1.41 was introduced to calculate the magnetic susceptibility. Table 2 shows the measurement data of magnetic susceptibility in the underground mine.

## Methods of studying the electrical resistivity of rocks and objects of study

The electrical resistivity of rocks is carried out both using samples in a laboratory and in natural occurrence. This kind of work has already been done in laboratory setting but with other species of rocks [12, 13]. We used standard samples in the form of cubes of size 24 × 24 × 24 mm, the composition of which was examined using the binocular enhancer MBS-10 for studying the electrical resistance. The measurements were carried out along three axes since almost all samples have anisotropy. Table 3 shows the average measurement data for different axes. The teraohmmeter E6-13A was used for working. The measurements were carried out according to the method described in [14]. In addition, Table 3 shows the average data of magnetic susceptibility measured along three axes using the same samples in laboratory setting (PIMV-M device).

## Discussion of results

The average values of magnetic susceptibility of various rocks and ore complexes of the Mariinsky emerald-beryllium deposit are close (with the exception of serpentinites). The unevenness in magnetization intensity of rocks indicates the connection of their magnetic properties with accessory minerals that are found in them. In serpentinites, magnetite $Fe_3O_4$ (magnetic susceptibility is 4 ... 25 SI units) is most common, and chromite is found. In diorite porphyrites – pyrrhotite $Fe_6O_7$ (magnetic susceptibility

**Table 2. Average data for magnetic susceptibility of the main rocks of the Mariinsky field obtained directly from measurements in an underground mine.**
**Таблица 2. Средние показатели магнитной восприимчивости основных пород Мариинского месторождения, полученные непосредственно при измерениях в подземном руднике.**

| Names of rocks | Number of measurements | The average χ, SI units · $10^{-4}$ | The average, taking into account the coefficient 1.41, SI units |
|---|---|---|---|
| Serpentinites | 25 | 7.2 | 10.2 |
| Talc schists and rocks | 39 | 3.4 | 4.8 |
| Diorite porphyrite and quartz diorite | 62 | 5.2 | 7.3 |
| Tremolite-actinolite schists | 13 | 3.1 | 4.4 |
| Chlorite schists | 7 | 2.7 | 3.8 |
| Quartz-plagioclase veins | 10 | – | – |
| Micaceous assemblage | 43 | 1.5 | 2.1 |
| Carbon-bearing-siliceous shales | 10 | 5 | 7.1 |

**Table 3. Characteristics of the main host rocks and ore complex of the Mariinsky deposit.**
**Таблица 3. Характеристики основных вмещающих пород и рудного комплекса Мариинского месторождения.**

| Sample number | Rock | Texture | Mineral composition | Peculiar properties | Magnetic susceptibility, SI units | Electrical resistivity, MOhm |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1A<br>1B | Quartz-plagioclase | Massive | Quartz – 80 %,<br>plagioclase – 20 %,<br>sulfides (less than 1 %) | Sulphide mineralization in gray quartz | 0 | 900 000<br>900 000 |
| 2A<br>2B | Glimmerite | Schistic | Bastonite | Occasional ore inclusions | $2.4 \cdot 10^{-4}$ | 200 000<br>320 000 |
| 3A<br>3B | Glimmerite | Massive | Light-colored micas<br>sulfides (less than 1 %) | Small sulphides are distributed unevenly | $4.3 \cdot 10^{-4}$ | 100<br>95 |
| 4A<br>4B | Glimmerite | Stratified | Brown-colored mica – 90%,<br>feldspar – 10 % | Feldspar grains in glimmerite | $2.9 \cdot 10^{-4}$ | 340<br>180 |
| 5A<br>5B | Serpentinite | Massive, eutaxic | Serpentine – 90 %, talc – 10 % | Ore mineral is not visible | $1.7 \cdot 10^{-4}$ | 25 000<br>25 000 |
| 6A<br>6B | Plagioclase gabbro | Massive, spotted | Amphibole – 80 %, feldspar – 20 % | Ore and sulphide mineralization is not detected | $1.7 \cdot 10^{-4}$ | 27 000<br>28 000 |
| 7A<br>7B | Quartz-muscovite rock | Massive, eutaxic | Quartz – 20%, light-colored mica – 0%, brown-colored mica – 50% | Rare small, sulphide mineralization | $5.0 \cdot 10^{-5}$ | 900 000<br>450 000 |
| 8A<br>8B | Talc-serpentinite | Knotty | Serpentine – 68 %,<br>talc – 30 %,<br>ore mineral – 2 % | Pulverous ore inclusion | $1.8 \cdot 10^{-4}$ | 400<br>450 |
| 9A<br>9B | Talc | Massive, schistic | Talc – 95 %, ore mineral (4-5 %) | Ore mineral is distributed evenly along stratification | $6.2 \cdot 10^{-4}$ | 300 000<br>170 000 |
| 10A<br>10B | Phlogopite-plagioclase | Knotty | Plagioclase – 60 %, brown-colored mica (40 %) | Mica evaluates along cracks in plagioclase vein | $5.0 \cdot 10^{-5}$ | 70 000<br>80 000 |
| 11A<br>11B | Silicious-carbon-bearing rock with mica | Massive | Mica – 80 %,<br>Carbon-bearing substance –14 %,<br>ore mineral – 1 % | Single grains of ore mineral | $3.2 \cdot 10^{-4}$ | 0.36<br>0.24<br>700 |
| 12A<br>12B | Talc-actinolite | Massive | Actinolite – 70 %,<br>talc –15 %,<br>phlogopite –13 %,<br>ore mineral (about 1–2 %) | Single grains of ore mineral are distributed unevenly. | $1.4 \cdot 10^{-4}$ | 90 000<br>17 000 |
| 13A<br>13B | Glimmerite | Schistous | Brown-colored mica – 100 %, | Ore mineral is not identified | $2.0 \cdot 10^{-4}$ | 50 000<br>30 000 |

| Sample number | Rock | Texture | Mineral composition | Peculiar properties | Magnetic susceptibility, SI units | Electrical resistivity, MOhm |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 14A<br>14B | Amphibolite | Massive | Plagioclase – 40 %, amphibole – 45 %, mica – 5 % | Single inclusions of ore mineral are noted. | $3.2 \cdot 10^{-4}$ | 2000<br>1750 |
| 15A<br>15B | Quartz-mica schist | Schistous | Mica – 80 %, quartz – 15 %, | Ore mineral is not identified | $4.0 \cdot 10^{-4}$ | 300 000<br>400 000 |
| 16A<br>16B | Serpentinite | Massive, spotted | Serpentine – 96 %, ore mineral – 4 % | Ore mineral (veinlets) is unevenly distributed | $2.8 \cdot 10^{-4}$ | 310<br>360<br>2400<br>3500 |
| 17A<br>17B | Serpentinite | Massive | Serpentine – 90 %, ore mineral – 10 % | Ore mineral is distributed unevenly | $2.5 \cdot 10^{-3}$ | 25 000<br>18 000 |
| 18A<br>18B | Diorite | Massive, knotty | Amphibole – 35%, plagioclase – 45%, mica – 15%, quartz – 5% | Ore mineral is not identified | $1.5 \cdot 10^{-4}$ | 1600<br>2400 |
| 19A<br>19B | Quartz rock | Massive | Quartz – 100 %, | Ore mineral is not identified | 0 | 50 000<br>400 000 |
| 20A<br>20B | Chlorite-talc | Schistous | Talc – 75 %, chlorite – 20 %, ore mineral (less than 5 %) | Ore mineral (silt) is evenly distributed | $2.0 \cdot 10^{-4}$ | 9000<br>320 000 |
| 21A<br>21B | Glimmerite with fluorite | Schistous | Mica – 75 %, fluorite– 25 % | Ore mineral is not identified | $1.7 \cdot 10^{-4}$ | 150 000<br>100 000 |
| 22A<br>22B | Serpentinite | Massive | Serpentine – 95 %, talc – 4 %, ore mineral – 1 % | Ore mineral (single grains) is distributed unevenly | $6.5 \cdot 10^{-4}$ | 320 000<br>20 000 |
| 23A<br>23B | Talcose serpentinite | Massive | Talc – 45 %, Serpentine – 40 %, ore mineral – 5 % | Ore mineral (single grains) is distributed extremely unevenly | $1.5 \cdot 10^{-4}$ | 600 000<br>80 000 |
| 24A<br>24B | Dolerine with phlogopite | Schistous | Talc – 65 %, mica – 34 %, ore mineral – 1 % | Ore mineral in the form of small grains | $2.2 \cdot 10^{-4}$ | 170 000<br>100 000 |
| 25A<br>25B | Diorite | Schistous | Amphibole 5-7 %, feldspar – 65 %, mica – 25-30 % | Ore mineral is not identified | $1.3 \cdot 10^{-4}$ | 300 000<br>200 000 |
| 26A<br>26B | Talcose serpentinite | Massive | Serpentine – 80 %, talc – 15 %, ore mineral (about 5 %) | Ore mineral (bunches) is distributed very unevenly | $4.0 \cdot 10^{-4}$ | 90 000<br>150 000 |
| 27A<br>27B | Actinolite-chlorite Schist | Massive | Actinolite – 60 %, talc – 35 %, ore mineral (about 5 %) | Ore mineral (single grains) is distributed unevenly | $1.7 \cdot 10^{-4}$ | 110<br>115 |
| 28A<br>28B | Chlorite-talc-actinolite | Schistic | Amphibole – 44 %, chlorite – 25 %, talc – 30 %, ore mineral – 1 % | Ore separation in the form of fine grains | $2.3 \cdot 10^{-4}$ | 32<br>40<br>2300<br>2200 |
| 29A<br>29B | Serpentinite | Knotty | Serpentine – 80 %, talc – 15 % ore mineral (5 %) | Ore mineral (fine impregnation) is distributed along cracks and occasionally | $1.7 \cdot 10^{-4}$ | 4500<br>4700 |
| 30A<br>30B | Serpentine-talc rock | Knotty, eutaxic | Serpentine – 30 %, talc 65 %, ore mineral (5 %) | Ore mineral (single grains) is distributed extremely unevenly | $3.5 \cdot 10^{-4}$ | 55 000<br>320 000 |

is $10^{-2}$ ... $10^{-1}$ SI units), ilmenite (magnetic susceptibility is 4… 25 SI units) and titanite (less commonly magnetite). There are magnetite, ilmenite, and titanite in talc, chlorite and tremolite-actinolite schists, which affect the overall magnetic susceptibility of rocks. Mica complexes mainly consist of phlogopite (magnetic susceptibility is $20 \cdot 10^{-5}$ SI units), but chromite, ilmenite, and titanite are rarely found in them. The content of accessory minerals in micas does not exceed two decimal places and three decimal places [15]. Sometimes fine-grained magnetite is found in apodiorite glimmerites, which increases the overall magnetic

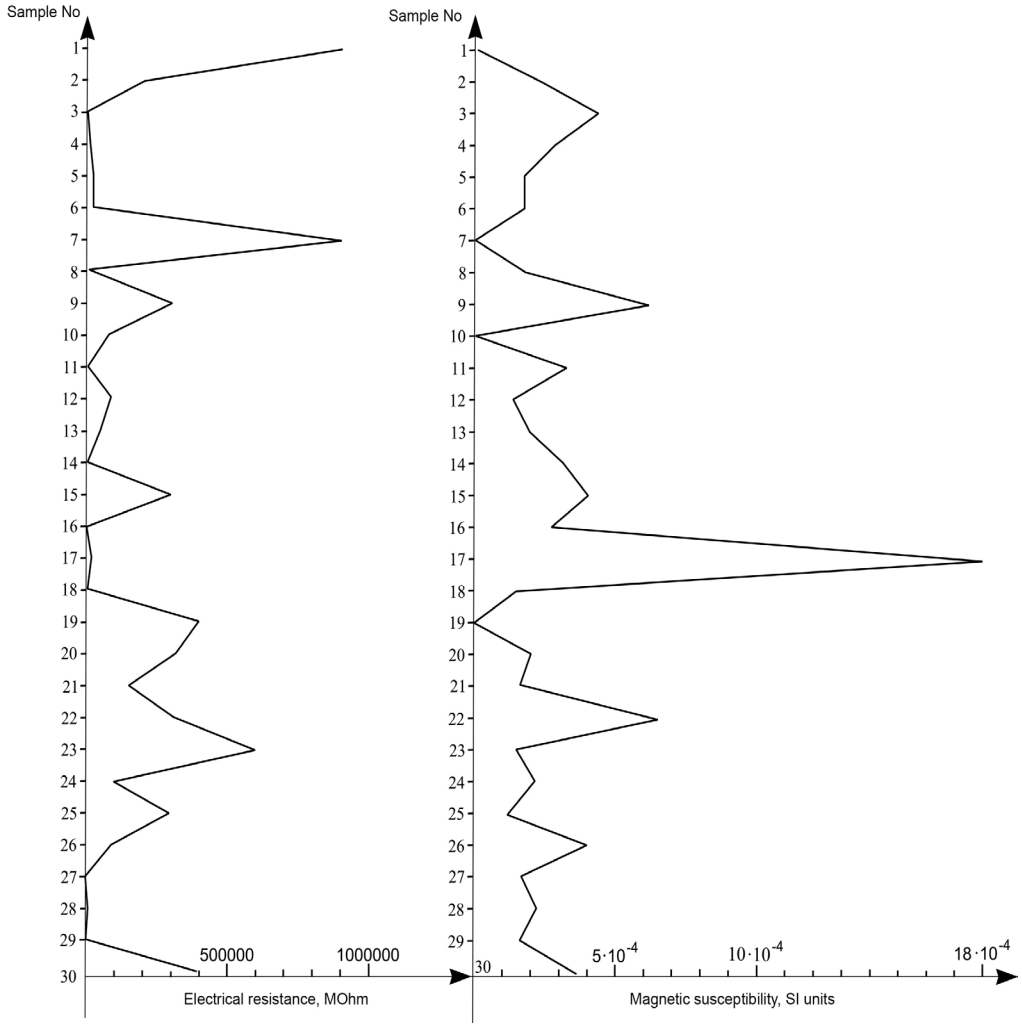



**Figure 2. Values of electrical resistance and magnetic susceptibility for selected samples from the Mariinsky deposit.**
**Рисунок 2. Значения электросопротивления и магнитной восприимчивости на отобранных образцах с Мариинского месторождения.**

susceptibility of these rocks. The magnitude of the magnetic susceptibility of quartz-plagioclase veins is below the measurement limit of the PIVM-M device ($k < 10^{-5}$ SI units) due to the absence of the main "magnetic minerals" (magnetite, pyrrhotite, ilmenite). The location of ore-bearing zones along the boundaries of the contacts of serpentinites with glimmerites makes it possible to identify zones of these contacts by magnetic susceptibility. Serpentinites have a greater magnetic susceptibility ($10^{-4}$ ... $10^{-3}$ SI units) than other rocks.

The works carried out by the authors in the mine of the Mariinsky emerald-beryllium deposit followed by laboratory studies showed that the main carrier rocks of beryllium mineralization (glimmerites and quartz-plagioclase veins) differ in magnetic susceptibility from other rocks of this deposit. Thus, the magnetic susceptibility of phlogopite schists ranges from 0.2 to $2.3 \cdot 10^{-4}$ SI units. The magnetic susceptibility of plagioclase-quartz veins is equal to zero. The host rocks (serpentinites), in turn, have a magnetic susceptibility $30 \cdot 10^{-4}$ SI units. The obtained values of apparent resistivity also show the difference between unproductive vein complexes and those containing the ore component (beryl). In addition, there is a dependence of the electrical resistance values of hyperbasites on the degree of metamorphism:

– peridotites slightly serpentinized – 1600 ... 2400 MOhm, sam. No 18;
– serpentinites –3500… 25 000 MOhm, sam. No 5, 16, 22;
– serpentinite-talc-carbonate rocks – 400 ... 450 MOhm, sam. No 8;
– mica veins – 30 000 ... 320 000 MOhm, sam. No 13, 2.

According to the results of the work, it was found that mica veins are found only in hyperbasites of low-resistivity. It is obvious that the decrease in electrical resistance is due to a complex of metamorphic processes. Mica veins are distinguished among host rocks by high electrical resistance, which is caused by their composition – these are schists consisting mainly of phlogopite with mica scales along schistosity. According to the data of parametric measurements of samples in early studies [2], the average specific electrical resistance of mica veins is 70 000 Ohm · m, which is significantly higher than the electrical resistance of host rocks. A similar situation is observed in our research.

If we jointly construct graphs (Fig. 2) of magnetic susceptibility and electrical resistance for various types of rocks found in the Mariinsky deposit, then it can be noted that the separation of mica veins only according to magnetic susceptibility is impossible due to a large number of nonmagnetic rocks. The separation of productive mica veins only according to the electrical resistiv-

ity data is also not possible due to the presence of rocks of the same electrical resistivity. However, the use of these two methods at the same time when setting certain studied parameters makes it possible to create equipment for the express method of inspection and selection of promising ore zones (complexes).

## Conclusions

The method proposed by the authors is based on difference in magnitude of the magnetic susceptibility and electrical resistance in the ore and ore-free sites. For each of the parameters studied, it is impossible to indicate unequivocally about the degree of mineralization; however, their complex use and interpretation allow us to identify signs by which ore zones can be distinguished in the field.

The use of this express method at the site (in mine workings) will allow for prompt determination of the location of serpentinite bodies and talc schists, in contact of which micaceous complexes productive for beryllium mineralization are often found.

This method (with a large set of statistical data) will allow us to confidently distinguish productive apohyperbasite glimmerites from unproductive apodiorite and other micaceous complexes at the Mariinsky deposit.

## Acknowledgements

This work was supported partly by the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences Program called "Development of petrophysical methods for studying rocks and ores in order to study the geological structure of deposits and improve their prospecting and exploration methods" (Project 18-5-5-52) and the state program called "Reconstruction of the formation conditions complexes of the Ural-Mongolian fold belt and associated mineralization "(State number AAAA-A18-118052590033-3).

## REFERENCES

1. Shestakov V. V. 1987, *Yaderno-geofizicheskiy ekspress-analiz transportiruyemykh rud i resursosberegayushchiye tekhnologii* [Nuclear and geophysical express analysis of transported ores and resource-recovery technologies]. Sverdlovsk, 110 p.
2. 2008, *Otsenka resursnogo potentsiala izumrudonosnykh formatsiy Rossii na osnove razrabotki sovremennykh prognozno-poiskovykh kompleksov: sbornik statey po otsenke mestorozhdeniy perspektivnykh dragotsennykh kamney* [Evaluation of the resource potential of emerald-bearing formations of Russia based on the development of modern expected and prospecting complexes: collected papers on the evaluation of deposits of promising gems]. Moscow, 246 p.
3. Everett M. E. 2013, Near-Surface Applied Geophysics. Cambridge: Cambridge University Press, 442 p.
4. Hao J., Gu Z., Zhou J. 1997, Anisotropy of magnetic susceptibility of rocks induced by experimental deformation. *Annals of Geophysics*, vol. 40, no. 2, pp. 455–462. https://doi.org/10.4401/ag-3923
5. Zhernakov V. I. 1998, Topaz-paragonite metasomatic complexes of the Mariinsky emerald deposit. In: Geology of metamorphic complexes. Ekaterinburg, pp. 94–101.
6. Zolotukhin F. F. 1996, *Mariinskoye (Malyshevskoye) mestorozhdeniye izumruda, Sredniy Ural* [Mariinskoye (Malyshevskoye) emerald deposit, the middle Urals]. Asbest; Ekaterinburg; Saint-Petersburg, 70 p.
7. Zhernakov V. I. 1982*, Opredeleniye polozheniya izumrudnogo orudeneniya v metasomaticheskikh kolonkakh slyuditovogo tipa* [Determination of the position of emerald mineralization in metasomatic columns of mica type]. Metasomatism and ore formation: Proceedings of the All-Russian conference (November 23–25) Kiev, pp. 24–25.
8. Hoover D. B., Williams B., Williams C., Mitchell C. 2008, Magnetic susceptibility, a better approach to defining garnets. *The Journal of Gemmology*, vol. 31, no. 3/4, pp. 91–103.
9. Grimley D. A., Wang J.-S., Liebert D. A., Dawson J. O. 2008, Soil magnetic susceptibility: a quantitative proxy of soil drainage for use in ecological restoration. *Restoration Ecology*, no. 16, pp. 657–667. https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.2008.00479.x
10. Zhanxiang He, Yunxiang Liu, Xiaodong Suo, Dong Weibin. 2008, Application of Magnetic Prospecting in Recognition of Volcanic Reservoirs. Recorder (official publication of the Canadian Society of exploration geophysicists), vol. 33, no. 01, pp. 45–48.
11. Filatov V. V. 2008*, Magnitorazvedka: magnitnaya vospriimchivost', indutsirovannaya i yestestvennaya ostatochnaya namagnichennosti* [Magnetic survey: magnetic susceptibility, induced and natural residual magnetization]. Ekaterinburg, 236 p.
12. Amadu Casmed Charles, Gawu Simon K. Y, Abanyie K. Samuel. 2018, Experimental Study of Electrical Resistivity to Rock Fracture Intensity and Aperture Size. *International Journal of Physics*, vol. 6, no. 3, pp. 85–92. https://doi.org/10.12691/ijp-6-3-4
13. Permyakov M. E., Manchenko N. A., Duchkov A. D., Manakov A. Yu., Drobchik A. N., Manshtein A. K. 2017, Laboratory modeling and measurement of the electrical resistivity of hydrate-bearing sand samples. *Russian Geology and Geophysics*, vol. 58, pp. 642–649. https://doi.org/10.1016/j.rgg.2017.04.005
14. Bakhterev V. V. 2015, Regularities of changes in the electrical parameters of rock samples of hyperbasite massifs of the Urals at high temperatures. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy* [Proceedings of Higher Schools], including the journal *Geologiya i Razvedka* [Geology and Exploration], no. 2, pp. 41–47. *(In Russ.)* https://doi.org/10.32454/0016-7762-2015-2-41-47
15. Laskovenkov A., Fand N., Zhernakov V. 1990, An Update on the Ural Emerald Mines. *Gems & Gemology*, vol. 31, no. 2, pp. 106–113.

*The article was received on November 13, 2018*

УДК 550.832.9 https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-1-39-47

# Геофизические критерии выделения продуктивных слюдитовых жил Мариинского изумрудно-бериллиевого месторождения (Средний Урал)

**Михаил Петрович Попов**[1, 2*],
**Олег Петрович Пелешко**[3,**],
**Евгения Анатольевна Баженова**[4,***],
**Виктор Сергеевич Иванченко**[4,****],
**Владимир Васильевич Бахтерев**[4,*****]

[1]Уральский государственный горный университет, Россия, Екатеринбург
[2]Институт геологии и геохимии им. А. Н. Заварицкого УрО РАН, Россия, Екатеринбург
[3]АО «Мариинский рудник», Россия, Свердловская область, г. Асбест, пос. Малышева
[4]Институт геофизики им. Ю. П. Булашевича УрО РАН, Россия, Екатеринбург

***Актуальностью*** работы является разработка новых методов оперативного выделения (обнаружения) рудных тел непосредственно в подземном руднике месторождения. Измерения были проведены как на специально подготовленных образцах в форме кубиков одного размера, так и в условиях естественного залегания.
***Целью работы*** является изучение магнитной восприимчивости и электросопротивления основных вмещающих пород и рудного комплекса (изумрудоносных слюдитов и кварц-плагиоклазовых жил с бериллом) на самом известном уральском изумрудно-бериллиевом месторождении – Мариинском.
***Методология исследования:*** для исследований магнитных свойств типовых пород и рудных тел Мариинского месторождения непосредственно в подземном руднике использовался измеритель магнитной восприимчивости полевой ПИМВ-М с диапазоном измерения $1 \cdot 10^{-5}$…1 ед. СИ. Относительная погрешность измерения не превосходит ±10 % в диапазоне $10^{-4}$…1 ед. СИ. Измерение проводилось путем плотного прикладывания плоской поверхности первичного преобразователя прибора к стенке забоя в литологически однородный участок с последующим измерением и записью полученного значения в полевой журнал документации горных выработок. Для изучения электросопротивления были использованы стандартные образцы в форме кубиков размером 24 × 24 × 24 мм, состав которых параллельно изучался под бинолупой МБС-10. Измерения проводились по трем осям, так как практически у всех образцов присутствует анизотропия. Для работы использовался тераомметр Е6-13А.
***Результаты.*** Приведены данные по магнитной восприимчивости и электросопротивлению основных вмещающих пород и рудного комплекса (изумрудоносных слюдитов и кварц-плагиоклазовых жил с бериллом) с Мариинского месторождения. Все данные согласованы с петрографическими характеристиками пород.
***Выводы.*** Показана принципиальная возможность создания новой экспресс-методики выделения продуктивных слюдитовых жил в скважинах и забоях по одновременному измерению магнитной восприимчивости и электросопротивления пород непосредственно в процессе добычных работ в подземном руднике.

*Ключевые слова*: Урал, магнитная восприимчивость, электросопротивление, слюдиты, кварц-плагиоклазовые жилы, изумрудно-бериллиевые месторождения, Уральские изумрудные копи.

*Работа выполнена частично при поддержке Программы УрО РАН «Разработка петрофизических методов исследований горных пород и руд с целью изучения геологического строения месторождений и совершенствования методов их поиска и разведки» (Проект 18-5-5-52) и государственной программы «Реконструкция условий формирования габбро-ультрабазитовых комплексов Урало-Монгольского складчатого пояса и связанного с ними оруденения» (Гос. номер АААА-А18-118052590033-3).*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Шестаков В. В. Ядерно-геофизический экспресс-анализ транспортируемых руд и ресурсосберегающие технологии. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1987. 110 с.
2. Оценка ресурсного потенциала изумрудоносных формаций России на основе разработки современных прогнозно-поисковых комплексов: сборник статей по оценке месторождений перспективных драгоценных камней. М.: ФГУП «Центркварц», 2008. 246 с.
3. Everett M. E. Near-Surface Applied Geophysics. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. 442 p.
4. Hao J., Gu Z., Zhou J. Anisotropy of magnetic susceptibility of rocks induced by experimental deformation // Annals of Geophysics. 1997. Vol. 40, № 2. P. 455–462. https://doi.org/10.4401/ag-3923
5. Жернаков В. И. Топаз-парагонитовые метасоматические комплексы Мариинского месторождения изумруда // Геология метаморфических комплексов. Екатеринбург: УГГГА, 1998. С. 94–101.
6. Золотухин Ф. Ф. Мариинское (Малышевское) месторождение изумруда, Средний Урал. Асбест; Екатеринбург; СПб.: СПбГУ, 1996. 70 с.
7. Жернаков В. И. Определение положения изумрудного оруденения в метасоматических колонках слюдитового типа // Метасоматизм и рудообразование: тез. докл. V Всерос. конф. (23–25 нояб.). Киев, 1982. С. 24–25.
8. Hoover D. B., Williams B., Williams C., Mitchell C. Magnetic susceptibility, a better approach to defining garnets // The Journal of Gemmology. 2008. Vol. 31, № 3/4. P. 91–103.

* popovm1@yandex.ru
http://orcid.org/0000-0002-0527-8234
** o.peleshko@ambercombine.ru
*** bazenova_jena@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-2068-7140
**** ivanchenko_05@mail.ru
http://orcid.org/0000-0002-1294-6050
***** ugv@bk.ru
http://orcid.org/0000-0002-1174-1301

9. Grimley D. A., Wang J.-S., Liebert D. A., Dawson J. O. Soil magnetic susceptibility: a quantitative proxy of soil drainage for use in ecological restoration // Restoration Ecology. 2008. № 16. P. 657–667. https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.2008.00479.x
10. Zhanxiang He, Yunxiang Liu, Xiaodong Suo, Dong Weibin. Application of Magnetic Prospecting in Recognition of Volcanic Reservoirs // Recorder (official publication of the Canadian Society of exploration geophysicists). 2008. Vol. 33, № 01. P. 45–48.
11. Филатов В. В. Магниторазведка: магнитная восприимчивость, индуцированная и естественная остаточная намагниченности. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2008. 236 с.
12. Amadu Casmed Charles, Gawu Simon K. Y, Abanyie K. Samuel. Experimental Study of Electrical Resistivity to Rock Fracture Intensity and Aperture Size // International Journal of Physics. 2018. Vol. 6, № 3. P. 85–92. https://doi.org/10.12691/ijp-6-3-4
13. Permyakov M. E., Manchenko N. A., Duchkov A. D., Manakov A. Yu., Drobchik A. N., Manshtein A. K. Laboratory modeling and measurement of the electrical resistivity of hydrate-bearing sand samples // Russian Geology and Geophysics. 2017. Vol. 58. Issue 5. P. 642–649. https://doi.org/10.1016/j.rgg.2017.04.005
14. Бахтерев В. В. Закономерности изменения электрических параметров образцов горных пород гипербазитовых массивов Урала при высоких температурах // Изв. вузов. Геология и разведка. 2015. № 2. С. 41–47. https://doi.org/10.32454/0016-7762-2015-2-41-47
15. Laskovenkov A., Fand N., Zhernakov V. An Update on the Ural Emerald Mines // Gems & Gemology. 1990. Vol. 31, № 2. P. 106–113.

*Статья поступила в редакцию 13 ноября 2018 г.*

УДК 551.24: 553.982 https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-1-48-59

# Новые возможности обработки и интерпретации сейсмических данных в оценке перспективности локальных объектов

**Дулат Калимович АЖГАЛИЕВ**[1,*],
**Серик Мухамбетович ИСЕНОВ**[2],
**Самат Галымжанович КАРИМОВ**[3]

[1]ТОО «Компания «Недра-Инжиниринг», Республика Казахстан, Алматы
[2]ТОО «Геомедж KZ», Республика Казахстан, Алматы, Бостандыкский район
[3]Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева, Республика Казахстан, Астана

***Актуальность.*** Оценка перспектив нефтегазоносности поисковых объектов наряду с выяснением характера и особенностей их внутреннего строения обуславливает необходимость совершенствования новых направлений и тенденций в вопросе повышения качества результатов сейсмических исследований. Методы сейсморазведки являются основной информационной базой в подготовке и обосновании перспективных объектов, определении оптимального размещения проектных глубоких скважин. В связи с этим применение инновационных технологий в обработке и интерпретации сейсмических данных (2Д и 3Д – МОГТ) на современной стадии изученности приобретает большое значение.
***Цель и задачи.*** Необходимо дать оценку возможностям эффективного применения инновационных технологий на примере характерных участков в пределах Прикаспийского (восточная бортовая зона) и Шу-Сарысуского (Мойынкумская впадина) бассейна для выделения перспективных объектов в палеозойской толще. Задачей является обоснование применения новых технологий. Для этого определены три основных направления: оптимизации параметров полевых работ на этапе сбора первичной информации, развития и внедрения новых систем программного обеспечения и на этапе оптимизации технологий интерпретации и построения моделей.
***Результаты применения.*** Данные методы ориентируются на объекты, сопровождающиеся повышенной сложностью и условиями залегания. Более детально их применение рассмотрено на объектах восточного борта Прикаспийского бассейна. С учетом этого приведены особенности регионального и площадного прослеживания основных объектов, ориентированных на карбонатные толщи КТ-II и КТ-I. Приведены последние результаты и данные бурения по площадям Жанажол-Торткольской зоны поднятий, Боржер-Акжарской ступени, Останкуского прогиба (Акжар Восточный, Жанажол, Урихтау, Тузкум, Алибекмола). Отдельно показаны возможности сейсмических технологий в комплексе с данными ГИС в целях эффективного выделения потенциальных объектов интервалов для опробования. Накопленный опыт проведения сейсмических исследований и допущенных при этом издержек уточняется и способствует более эффективным подходам в их применении, в том числе высокоразрешающей сейсморазведки, методики многоазимутального ВСП, мультифокусинга и дифракционного мультифокусинга.
***Выводы.*** Новые перспективные объекты (при условии постановки для их детального изучения инновационных технологий) прогнозируются в относительно погруженных отдаленных районах восточной бортовой зоны (Шубаркудук-Коскольская и Боржер-Акжарская зоны поднятий). Обосновывается остающийся значительный и еще нереализованный в полной мере потенциал толщ КТ-II и КТ-I. Рассмотрены возможности расширения спектра направлений нефтепоисковых работ по изучению перспективных объектов и поднятий (верхний девон–нижний карбон, средний–верхний карбон, нижняя пермь).

*Ключевые слова:* Прикаспийский бассейн, восточный борт, карбонатные пачки КТ-II и КТ-I, палеозойский комплекс, сейсмические исследования 2Д/3Д, обработка данных и интерпретация, подсолевые отложения, перспективы нефтегазоносности, локальные поднятия, карбонатные породы, осадконакопление, углеводороды, направления геологоразведочных работ.

## Введение

### Задачи и факторы совершенствования сейсмических методов

Оценка перспектив нефтегазоносности поисковых объектов наряду с выяснением характера и особенностей их внутреннего строения обуславливает необходимость совершенствования новых направлений и тенденций в вопросе повышения качества результатов сейсмических исследований. Методы сейсморазведки, в свою очередь, являются основной информационной базой в подготовке и обосновании перспективных объектов, определении оптимального размещения проектных глубоких скважин при поисках и разведке нефти и газа.

Несмотря на очевидность необходимости дальнейшего совершенствования методов сейсморазведки 2Д и 3Д, в особенности обработки и интерпретации данных, не во всех перспективных регионах и бассейнах конкретные шаги в этом отношении проводятся успешно. Этому есть всем известные причины объективного характера, связанные:

– с ослаблением роли Комитета геологии и недропользования МИиР РК, ведущих профильных НИИ в управлении и реализации перспективных и текущих программ геологоразведочных работ (далее – ГРР) и в первую очередь в освоенных осадочных бассейнах страны;

– относительно низкой мировой ценой на нефть в последние годы на фоне объективного роста рыночной стоимости ГРР, в особенности наиболее технически и методически сложных методов и технологий (сейсморазведка в различных модификациях и др.) в современных условиях;

– желанием недропользователей упростить Рабочие программы по геологоразведке, порой с применением для поисковых работ относительно дешевых методов и технологий, чтобы получить сомнительные экономии по затратам на ГРР в кризисный период;

– пренебрежением в кризисный период другими важными для результативности ГРР в целом параметрами (глубоким научным анализом ГРР на всех этапах, нарушением принципов стадийности, требований положений Инструкций о подготовленности объектов к бурению, по объективной оценке запасов и т. д.).

Отметим при этом, что налицо фактическое желание ряда нефтяных компаний упростить применение и самой сейсморазведки ОГТ на конкретных объектах и ограничиться, например, лишь переобработкой старых материалов по

* dulat.azhgaliev@gmail.com
http://orcid.org/0000-0001-9770-0473

стандартным технологиям, забывая, что положительных результатов сейсмических исследований можно добиться в целом, соблюдая единство и тесную связь материала на всех трех этапах: полевые работы (первичный материал), обработка, интерпретация и моделирование.

Применение инновационных технологий в сейсмических методах важно как на этапе полевых работ (сбора информации), так и на этапах обработки первичной информации, интерпретации и построения моделей разреза. Соответственно применение инновационных технологий в современной сейсморазведке следует рассматривать также в трех взаимосвязанных направлениях [1].

1. Оптимизация параметров полевых работ, в особенности на этапе сбора первичной информации. Разнообразие сеймогеологической обстановки на значительной по площади территории Казахстана вынуждает порой отказаться от выработанных опытным путем некоторых осредненных параметров сейсмической съемки в зависимости от конкретных условий.

2. Развитие и внедрение новых систем программного обеспечения на этапах обработки первичной информации на сегодня характеризуется значительным прогрессом. Это достигнуто в результате применения в областях развития солянокупольной тектоники Прикаспийского бассейна программ глубинной миграции PSDM и RTM, основанных на миграционных преобразованиях временных разрезов до и после суммирования.

В связи с этим отметим, что с развитием технической базы и появлением суперкомпьютеров в начале XXI в. в ряде стран (включая Казахстан) активизировалось применение мощного программного комплекса «Мультифокусинг» (далее – МФ), позволяющего за счет многократного накопления сигнала в области Френеля резко увеличить разрешающую способность сейсмического сигнала и повысить соотношение сигнал/помеха.

3. На этапе оптимизации технологий интерпретации и построения моделей разреза, на котором используются данные предыдущих этапов, следует привлекать данные ГИС и керна скважин. Интерпретация в каждом программном комплексе завершается построением модели разреза по структуре, месторождению, в том числе получение трехмерной модели сложного строения месторождений на примере использования новейшего программного комплекса SKUA компании “Paradigm”, являющейся вместе с компанией “Shlumberger” основным поставщиком программных продуктов на рынке Казахстана (рис. 1).

## Опыт внедрения новых и инновационных технологий

Следует отметить, что внимание к новым методам со стороны недропользователей в настоящее время далеко недостаточное, что можно объяснить, на наш взгляд, кроме финансовой стороны, излишней осторожностью, свойственной при знакомстве и встрече с чем-то новым, отсутствием должной статистики в успешности проведения тех или иных уникальных методик.

Анализируя состояние проводимых сейсмических исследований по изученным регионам, отметим следующее. Наиболее системно в настоящее время проводятся сейсмические исследования на акватории Каспийского моря, начатые сравнительно недавно со съемки МОГТ-2Д (далее – 2Д) всей казахстанской части акватории моря, выполненной в 1993–

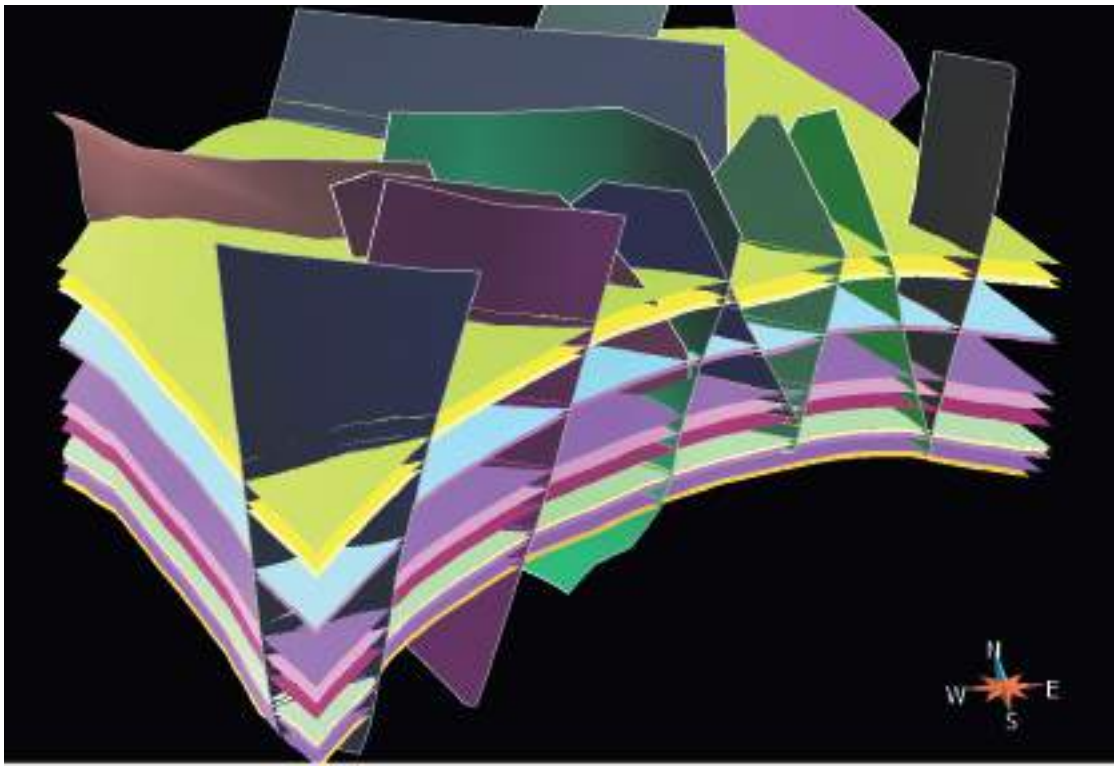



**Рисунок 1. Трехмерная модель строения месторождений с применением программы SKUA (по данным компаний “Paradigm” и “Shlumberger”).**

**Figure 1. Three-dimensional model of the structure of deposits using the program SKUA (according to the data of Paradigm and Shlumberger).**

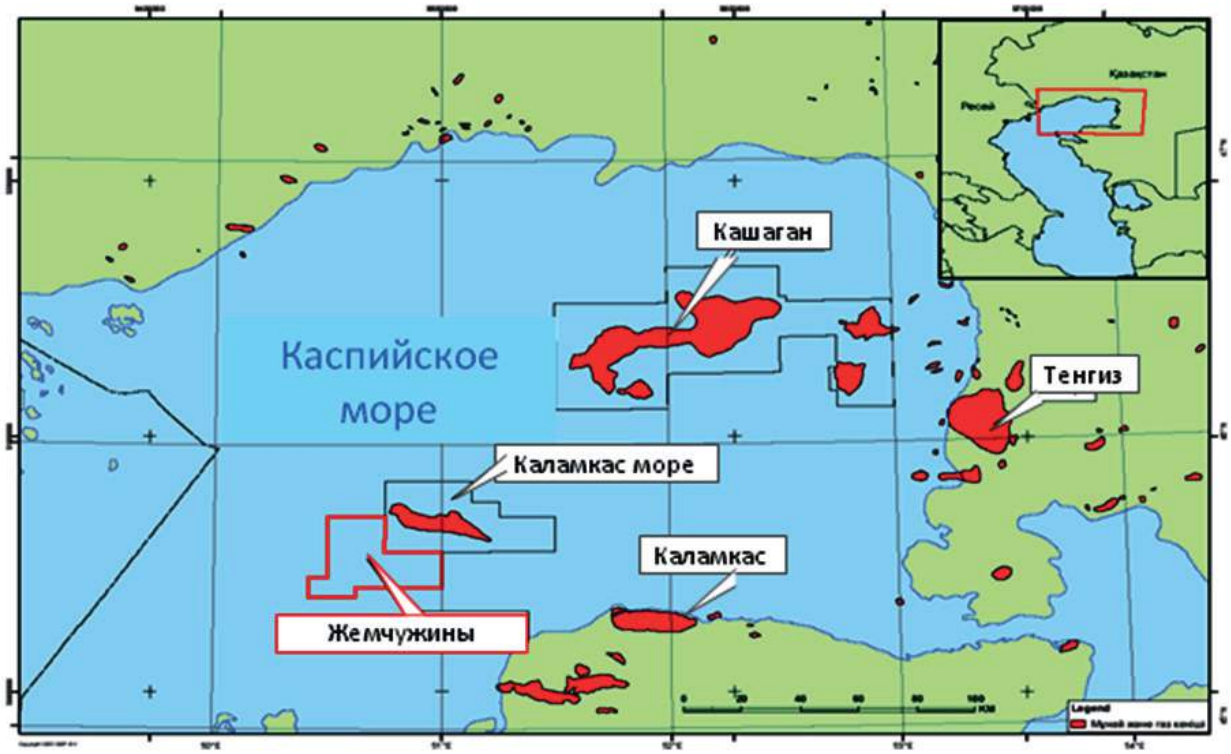



**Рисунок 2. Зоны нефтегазонакопления и месторождения акватории Северного Каспия и прибрежной части юга Прикаспийского бассейна (по данным АО НК «КазМунайГаз», 2013 г.).**
**Figure 2. Zones of oil and gas accumulation and deposits of the water area of the Northern Caspian and the coastal part of the south of the Pre-Caspian basin (according to AO NK KazMunaiGas, 2013).**

1995 гг. консорциумом «Казахстанкаспийшельф» по равномерной квадратной сети профилей с высокой кратностью наблюдений [2–4]. В последующем на перспективных участках проведено поисково-разведочное бурение, по результатам которого открыты месторождения Кашаганской группы, блоков «Жемчужины», «Н» и др. (рис. 2). После проведения на участках с обнаружениями работ МОГТ-3Д (далее – 3Д) и подсчета запасов в 2017 г. началось промышленное освоение залежей Кашаганской группы.

В целом при существенных успехах геологоразведки на акватории Северного Каспия следует отметить, что некоторая поспешность и порой замена качественной сейсмической съемки на детальном этапе дешевыми геофизическими методами (ДНМЭ и др.) привела к грубым просчетам и отрицательным результатам поисков на крупных блоках Курмангазы, Аташ, Тюб-Караган, т. е. повторное недостаточно обоснованное проведение съемки 2Д перед съемкой 3Д привело к существенному удорожанию проекта «Н». Проводимая 3Д-съемка на локальных морских объектах, к сожалению, также не отличается высокой экономической эффективностью из-за малых площадей размещения съемки и удаленности их друг от друга.

На суше до 1970-х гг. в относительно простых по геологическому строению осадочных комплексах, вмещающих основные нефтегазопродуктивные горизонты на глубинах 3–4 км (Мангышлакский, Устюрт-Бозашинский, Шу-Сарысуский бассейны, включая и надсолевые месторождения Эмбинского района Прикаспийского бассейна), поисковые задачи решались даже при помощи упрощенной технологии сейсморазведки МОВ (кратностью до 6). А уже в 1980-х гг. с внедрением метода ОГТ (МОГТ) кратностью 12–24 и новых программных комплексов были открыты наши ныне действующие гиганты на глубинах до 6 км (Тенгиз, Карачаганак, Жанажол), разрез которых осложнен солянокупольной тектоникой.

В последующем принятая Правительством РК Программа «Глубокие горизонты», направленная на изучение и обнаружение залежей УВ на глубинах 7–8 км и более, предполагает необходимость дальнейшего совершенствования технологических аспектов при проведении сейсмических исследований [2, 5]. При этом основные принципы оптимизации технологий МОГТ в Казахстане, по мнению авторов, могут базироваться на ряде новых технологий сейсмических исследований, опробованных в Казахстане и успешно проявивших себя в решении сложных задач, стоящих перед сейсморазведкой [6].

### Предложения по проведению новых сейсмических методов

Высокоразрешающая сейсморазведка (далее – ВРС). Работы по данной методике в соответствии с проектом АО «КазТрансГаз» были начаты в опытном порядке в 2005 г. на участках барханных песков Мойынкумской впадины в Шу-Сарысуйском бассейне с участием партнерской компании из России. Работы проведены в районе газовых месторождений Мойынкумской впадины с началом их освоения. Эти месторождения были открыты более 40 лет назад и долгое время находились в консервации. На первоначальном этапе недропользователь решил ограничиться проведением работ МОГТ-3Д только в пределах наиболее крупного месторождения Амангельды на площади 100 км$^2$ с применением стандартной методики – виброисточников и системы наблюдений, наработанной в условиях других районов Казахс-

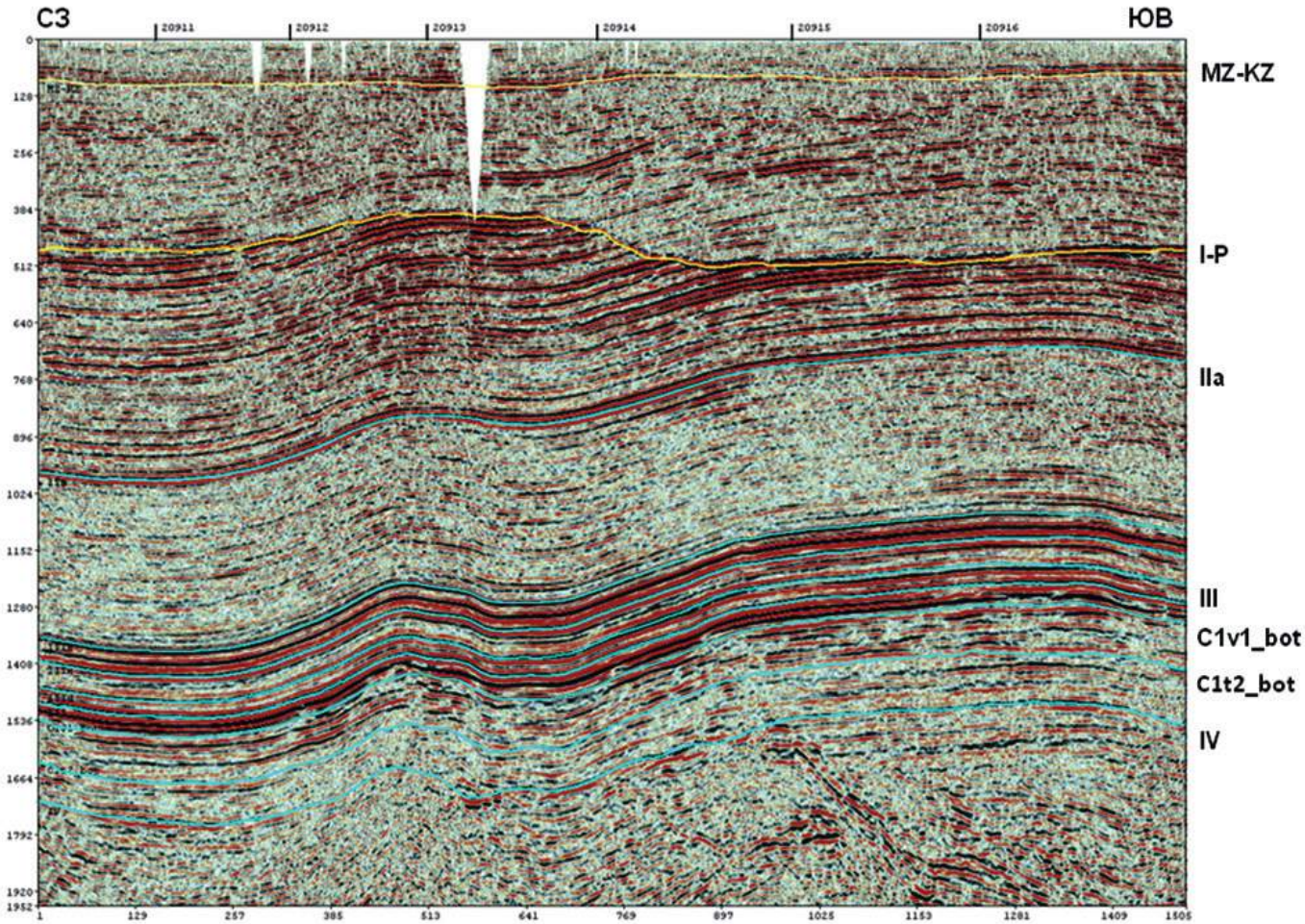



**Рисунок 3. Корреляция отражающих горизонтов по профилю 20917 по характерным структурам Мойынкумской впадины.**
**Figure 3. Tracking of reflection horizons along the profile 20917 using the characteristic structures of the Moiynkumskaya depression.**

тана. Однако, как показали результаты последующего анализа, полученные полевые сейсмические данные съемки 3Д в условиях сложного строения верхней части разреза (барханные пески до 50–70 м) и тонкослоистого разреза продуктивной толщи месторождения Амангельды оказались недостаточно информативными. Материалы выполненного динамического анализа сейсмических атрибутов до сих пор плохо увязываются с дебитами газа месторождения, находящегося в эксплуатации уже более 15 лет.

В поисках решения проблемы уже в 2005 г. АО «КазТранГаз» после проведения 3Д-съемки вынужден был отработать на месторождении несколько профилей по технологии ВРС. Вот уже более 10 лет успешно проводимые полевые работы по технологии ВРС в Мойынкумской впадине показывают высокую эффективность, несмотря на сложный характер разреза, резко ухудшающий качество первичного сигнала. Кроме существенного повышения соотношения «сигнал/помеха» и разрешенности сейсмической записи на временных разрезах, на некоторых участках (Султанкудук) удалось получить четкое отображение газо-водяного контакта залежи, подтвержденной результатами последующего бурения.

В дальнейшем эти работы стимулировали широкое применение данной технологии и на других месторождениях, включая отечественные палеозойские «гиганты» Тенгиз и Карачаганак [7]. Суть технологии заключается в возбуждении сигнала малыми зарядами, располагаемыми ниже зоны малых скоростей (ЗМС) на глубине 50–70 м. За счет существенного расширения спектра полезного сигнала в сторону высоких частот удалось резко увеличить разрешающую способность сейсморазведки. В результате оказалось возможным более уверенно выделять отражающие границы в сложном тонкослоистом разрезе палеозойской продуктивной толщи (рис. 3).

На более сложных по внутреннему строению перспективных территориях, полагаем, применение технологии ВРС позволило бы улучшить вертикальное разрешение сейсмической записи, что также характеризуется расширением амплитудно-частотного спектра в сторону высоких частот. В качестве такой территории в полной мере представляется Прикаспийский бассейн, высокоперспективный для обнаружения крупных залежей нефти и газа в палеозойском комплексе отложений. Ряд крупных месторождений открыт на восточном борту бассейна – Кожасай, Жанажол, Урихтау и др. (рис. 4). Сложность объектам данной категории дополнительно придает приуроченность их к мощным покровам барханных песков Кокжиде, развитых в приповерхностной зоне, аналогичных барханным пескам Мойынкумской впадины.

Авторами в свое время ставилась задача необходимости проведения сейсморазведки 3Д по технологии ВРС. К сожалению, предложенные ими доводы ранее оператором проекта Урихтау не были приняты, что в последующем привело к дублированию проведенных съемок 3Д с новыми параметрами на некоторых участках и, соответственно, к излишним затратам.

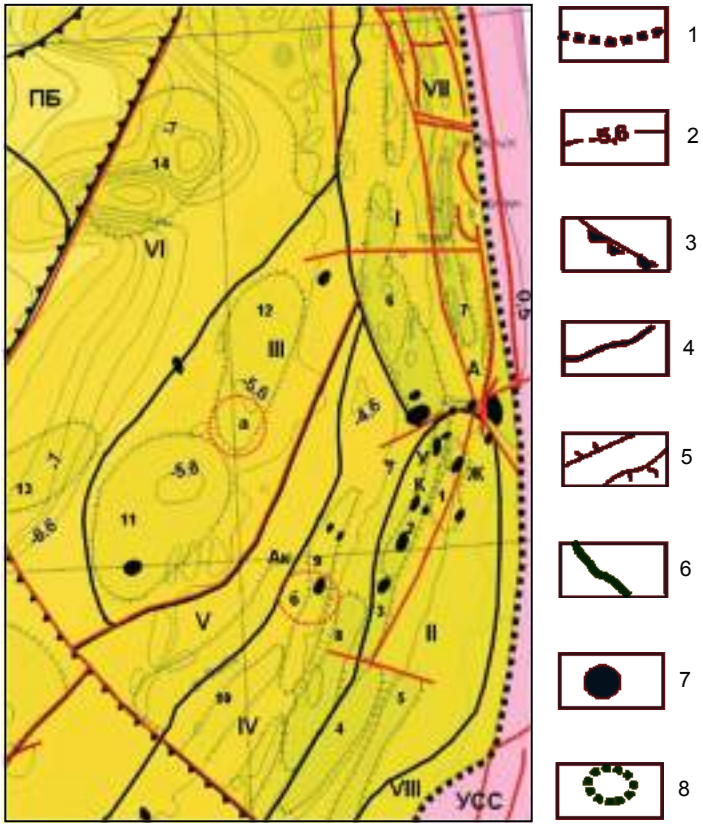



**Рисунок 4. Тектоническая схема палеозойского комплекса восточного борта Прикаспийского бассейна (У. А. Акчулаков и др., 2009–2013 гг.).** 1 – геоструктуры I-го порядка: ПБ – Прикаспийский бассейн, УСС – Уральская складчатая система; 2 – изогипсы по кровле палеозоя, км; 3 – контуры восточного борта Прикаспийского бассейна; 4 – элементы нижнего порядка; зоны поднятий: I – Темирская, II – Жанажол-Торткольская, III – Шубаркудук-Коскольская; ступени: IV – Боржер-Акжарская, V – Байганинская, VI – Егинды-Сарыкумакская, прогибы: VII – Остансукский, VIII – Терескенский; 5 – тектонические валы: 1 – Жанажол-Синельниковский, 2 – Урихтау-Кожасайский, 3 – Тузкумский, 4 – Торткольский, 5 – Восточно-Торткольский, 6 – Кенкияк-Аккудукский, 7 – Алибекмолинский, 8 – Боржерский, 9 – Акжарский, 10 – Акшункольский, 11 – Коскольский, 12 – Караулкельдинский, 13 – Сарыкумакский, 14 – Егинды-Кайндинский; 6 – разломы; 7 – месторождения УВ: А – Алибекмола, У – Урихтау, Ж – Жанажол, Ак – Акжар, К – Кожасай; 8 – участки развития крупных палеозойских поднятий: а – Шиликты – Шиликты Северный, б – Акжар-Курсай.

**Figure 4. Tectonic map of the Paleozoic complex of the eastern side of the Caspian basin (U. A. Akchulakov et al., 2009-2013).** 1 – geostructures of I-st order: PB – Pre-Caspian basin, UFS – Urals fold system; 2 – structural contours along the top of the Paleozoic, km; 3 – lineaments of the eastern side of the Pre-Caspian basin; 4 – elements of lower order; uplift zones: I – Temirskaya, II – Zhanazhol-Tortkolskaya, III – Shubarkuduk-Koskolskaya; steps: IV – Borzher-Akzharskaya, V – Baiganinskaya, VI – Egindy-Sarykumakskaya, depressions: VII – Ostansuksky, VIII – Tereskensky; 5 – tectonic ramparts: 1 – Zhanazhol-Sinelnikovsky, 2 – Urikhtau-Kozhasaysky, 3 – Tuzkumsky, 4 – Tortkolsky, 5 – Vostochno-Tortkolsky, 6 – Kenkiyak-Akkuduksky, 7 – Alibekmolinsky, 8 – Borzhersky, 9 – Akzharsky, 10 – Akshunkolsky, 11 – Koskolsky, 12 – Karaulkeldinsky, 13 – Sarykumaksky, 14 – Egindy-Kaindinsky; 6 – faults; 7 – hydrocarbon fields: A – Alibekmola, U – Urikhtau, Zh – Zhanazhol, Ak – Akzhar, K – Kozhasay; 8 – areas of development of large Paleozoic uplifts: a – Shilikty – Shilikty Severny, б – Akzhar-Kursay.

Кроме полевой сейсморазведки, в последние годы наметилась активизация внимания нефтегазовых компаний к более глубокому изучению околоскважинного пространства методами скважинной геофизики. Так, с применением данных технологий проведено «опробование» скважин месторождений Карачаганак, Кашаган, Алибекмола [6].

По комплексной методике многоазимутального ВСП (далее – МА ВСП) можно получить сейсмические изображения 2Д (3Д) околоскважинного пространства по нескольким азимутам. Новый метод основывается на применении многоуровневых зондов, позволяющем ускорить и удешевить работы ВСП, а в комплексе с МОГТ-2Д получить объемное изображение особенностей геологического строения вблизи критических скважин. Как известно, результаты вертикального сейсмического профилирования (далее – ВСП) служат для целей повышения точности съемки и реальной оценки параметров сейсмических сигналов. Однако ВСП на большинстве проектов и до сих пор применяется по устаревшей и достаточно простой технологии с применением 3–5 точечных приемников в зонде, требующей многократного перемещения зонда по стволу скважины и возбуждения сейсмических колебаний из нескольких пунктов.

В перспективе данные МА ВСП могут обеспечить не только детальное изучение околоскважинного пространства, включая прослеживание малоамплитудных тектонических нарушений и развития зон трещиноватости (каверно- и/или карстообразования), совместно с данными ГИС. При выявлении устойчивых корреляционных связей между параметрами сейсмических сигналов МА ВСП и физическими параметрами отложений, определенными по данным ГИС и керну, можно будет ожидать наличия подобных корреляционных связей с сейсмическими сигналами на данных наземной сейсморазведки.

Такой эксперимент с выполнением МА ВСП с одновременной наземной регистрацией сейсмических сигналов по соответствующим азимутальным линиям был реализован в АО НК «КазМунайГаз» (2011–2012 гг.) на месторождении

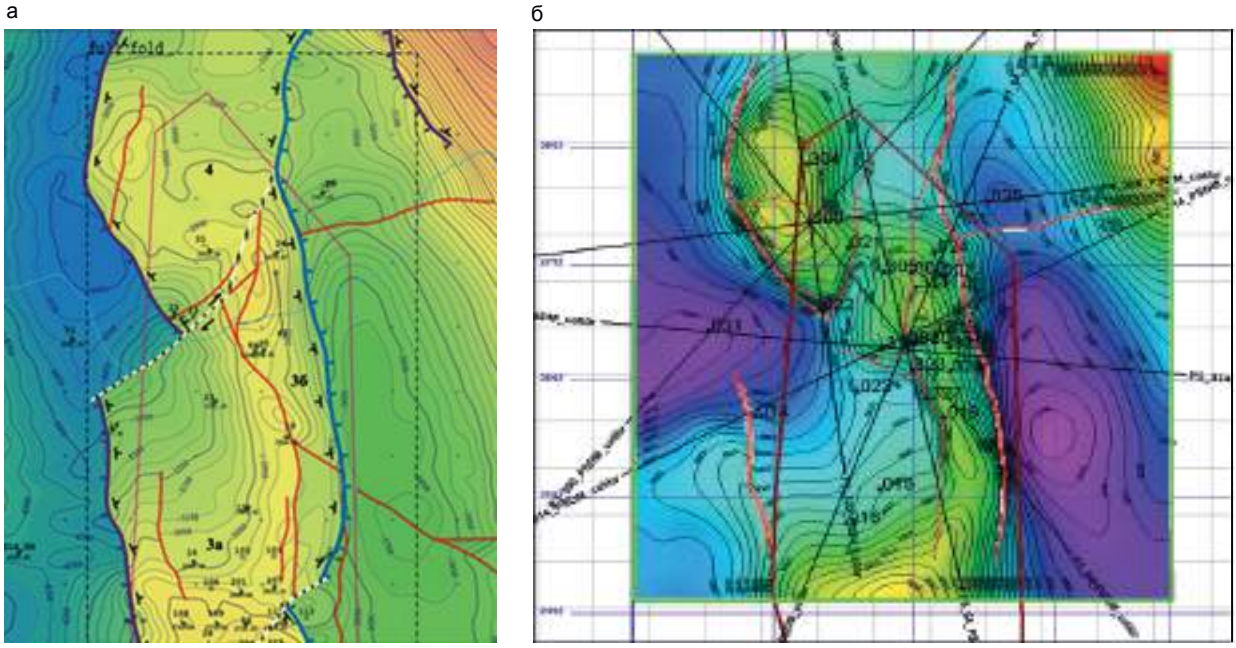



**Рисунок 5. Площадь Алибекмола. Структурная схема по кровле толщи КТ-II (по данным АО НК «КазМунайГаз», 2012 г.).** а – предварительная схема 2005 г.; б – схема 2011–2012 гг.

**Figure 5. The Alibekmola area. Structural scheme for the top of the KT-II stratum (according to the data of AO NK KazMunayGas, 2012).** a – preliminary scheme of 2005; б – the scheme of 2011–2012.

Алибекмола под методическим руководством авторов данной статьи и специалистов компаний "Shlumberger" и «Азимут энерджи сервисез». Применение инновационных технологий МФ и данных обработки МА-ВСП на объектах восточного борта Прикаспийского бассейна (Алибекмола, Кожасай) позволило в существенной мере улучшить соотношения сигнал/помеха, качественный прирост визуализации в трехмерном изображении особенностей сложного строения месторождений.

Весьма ценными в практическом отношении также являются результаты комплексного изучения структурного плана и распределения залежей УВ, полученные экспериментальным путем в центральной и сложной по строению северной части месторождения Алибекмола (рис. 5). Результаты комплекса геофизических методов, включая сейсмические (МА ВСП и МОГТ) и ГИС по глубокопроникающей акустике, позволили уточнить модель и выдать обновленную схему северной части месторождения, поясняющую причины низкого дебита нефти в скважинах северного блока месторождения Алибекмола относительно проектного уровня. Отметим, что ранее при проектировании разработки данного месторождения за основу была взята предварительная структурная схема 2005 г. и принятая ранее усеченная площадь съемки 3Д в северной части не позволила построить оптимальную геологическую модель. В сравнении с ней уточненная схема 2011–2012 гг. позволяет наглядно представить погрешности в построениях и модели строения сложной северной части месторождения. В последующем допущенные ранее при проведении геологоразведочных работ на северном блоке просчеты, приведшие, как известно, к значительным экономическим «издержкам», по данным бурения и результатам испытания новых поисковых скважин были подтверждены.

### Новое в обработке и интерпретации данных МОГТ

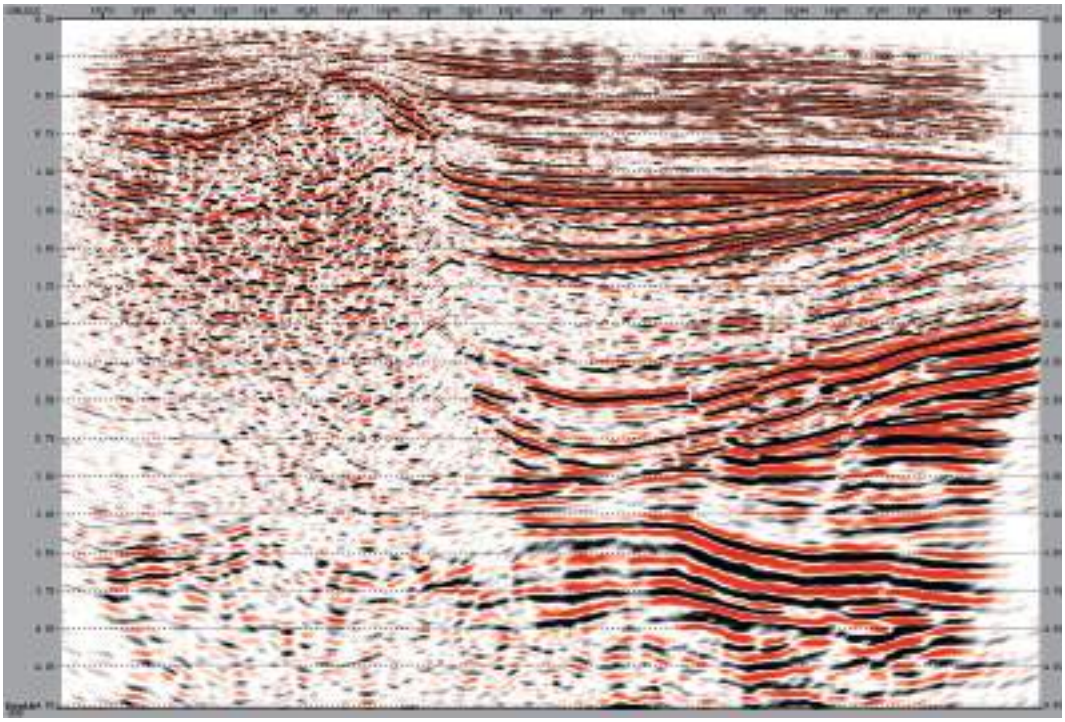
Среди проектов с применением инновационных «подходов» по сейсмическим исследованиям отметим исследования на базе новой технологии обработки данных сейсморазведки 3Д – Мультифокусинг (далее – МФ), направленной, в первую очередь, на повышение разрешающей способности отраженных волн за счет повышения соотношения «сигнал/помеха».

На объектах восточного борта Прикаспийского бассейна было получено сравнение стандартного глубинного куба «PSDM» и глубинного куба «PostSDM» на основе суммарного куба МФ. При этом глубинная миграция после суммирования (PostSDM) была выполнена с использованием идентичной глубинно-скоростной модели PSDM (рис. 6). Инновационная технология МФ в сравнении с МОГТ имеет ряд отличительных свойств, включая значительное увеличение статистического эффекта накапливания энергетических слабых сейсмических сигналов, учет локальной негиперболичности годографов отраженных волн, улучшающих качество сейсмического изображения на суммарном кубе МФ и сейсмической записи на улучшенных сейсмограммах до суммирования, сформированных по специальной опции МФ.

На глубинном кубе МФ+PostSDM значительно повышены качество прослеживания и вертикальная разрешенность сейсмической записи по опорным и вспомогательным отражающим горизонтам в подсолевом, надсолевом и соленосном комплексе в сравнении с кубом PSDM, полученным по стандартной технологии глубинной миграции до суммирования. В результате более четко выделяется грибообразный контур соляного купола, который ранее на кубе ОГТ имел трапециевидную форму. Существенно улучшилось изображение геологического строения карбонатно-терригенного комплекса под соляным куполом, осложненного амплитудными тектоническими разломами.

При обработке данных 3Д по технологии Дифракционный Мультифокусинг (далее – ДМФ) в интервале продуктивной карбонатной толщи из куба формируется схема амплитуд «объектов дифракции». Представляется график зависи-

а



б

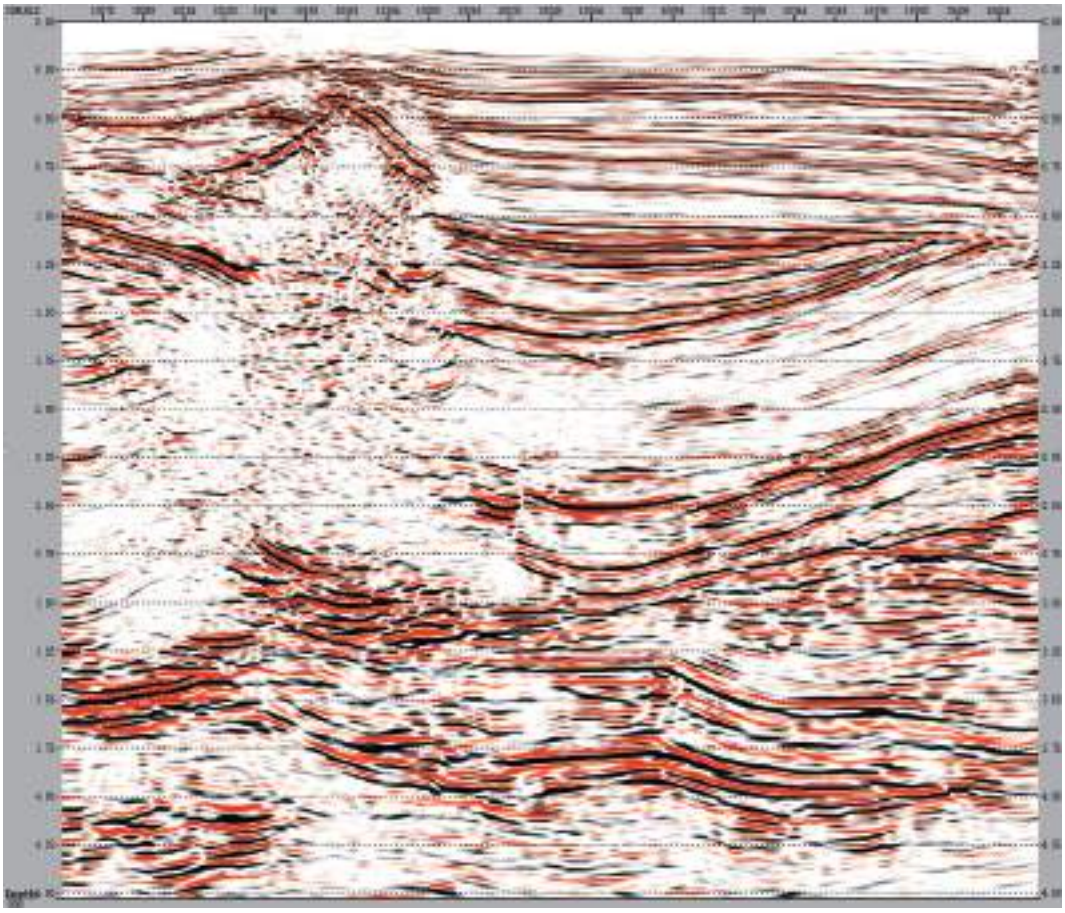


**Рисунок 6. Сравнение глубинных кубов.** а – стандартная обработка PSDM; б – методика Мультифокусинг+ PostSDM (по данным АО НК «КазМунайГаз»; 2012 г.).
**Figure 6. Comparison of deep volumes.** а – standard PSDM processing; б – a technique by Multifocusing + PostSDM (according to the data of AO NK KazMunayGas; 2012).

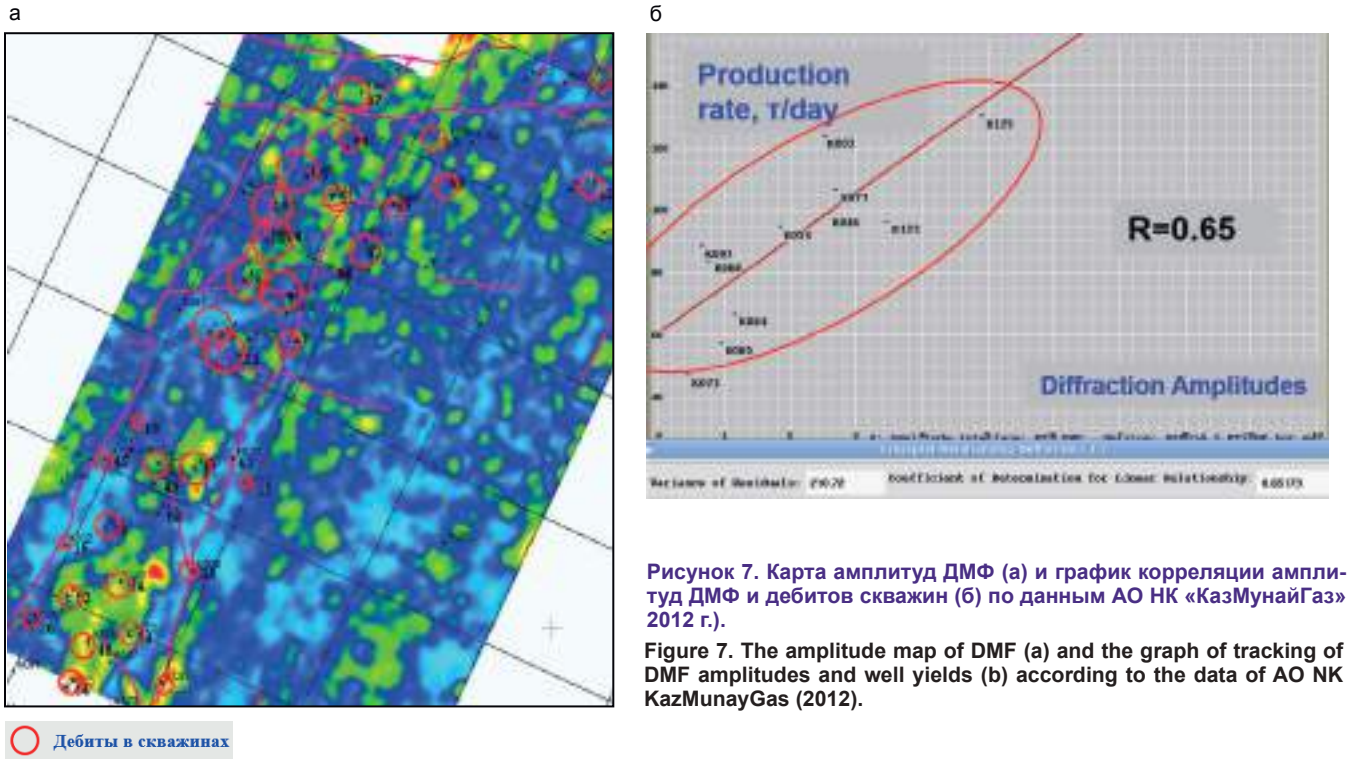



**Рисунок 7. Карта амплитуд ДМФ (а) и график корреляции амплитуд ДМФ и дебитов скважин (б) по данным АО НК «КазМунайГаз» 2012 г.).**

**Figure 7. The amplitude map of DMF (a) and the graph of tracking of DMF amplitudes and well yields (b) according to the data of AO NK KazMunayGas (2012).**

мости амплитуд «объектов дифракции» с дебитами нефти в эксплуатационных скважинах (рис. 7). При этом получен достаточно высокий коэффициент корреляции амплитуд ДМФ и дебитов нефти – 0,65. Дифрагированные волны формируются от локальных геологических объектов, которые могут быть связаны с зонами трещиноватости, малоамплитудных тектонических нарушений и пр., т. е. с зонами повышенной проницаемости нефти. Поэтому наличие данной корреляционной связи может стать важным поисковым признаком выявления таких локальных геологических объектов [6]. Как известно, дебит является важнейшим интегральным параметром, зависящим как от пористости, так и от проницаемости резервуара, возможно, и трещиноватости, латерального изменения мощности и фильтрационно-емкостных свойств пород-коллекторов (далее – ФЭС).

При учете данных подходов и новых методик исследований обеспечивается существенное повышение информативности и эффективности сейсморазведочных проектов, связанных с задачами поисковых объектов в палеозойской толще, выделение и оконтуривание которых в условиях развитой солянокупольной тектоники Прикаспийского бассейна представляется достаточно сложным. Далее дается краткое описание особенностей геологического строения ряда перспективных районов, в которых внимание акцентируется на необходимости применения инновационных сейсмических технологий для решения конкретных геологических задач.

Высокая перспективность и актуальность изучения крупных объектов в палеозойской толще Прикаспийского бассейна, высокая динамика в проведении нефтяных операций в целом и, в частности, ГРР характерны для Прикаспийского бассейна, потенциальные возможности которого намного превосходят таковые у остальных, также активно изучаемых промышленно-нефтегазоносных регионов и бассейнов (Мангистау, Устюрт-Бозаши и др.) [5, 8, 9]. Главное значение Прикаспия в оценке углеводородного потенциала в палеозойском комплексе, содержащем все известные зоны нефтегазонакопления (далее – ЗНГН) в отложениях преимущественно карбонатного состава, подтверждено результатами относительно недавно проведенного Проекта «Комплексное изучение осадочных бассейнов Республики Казахстан» (У. А. Акчулаков и др., 2009–2013 гг.).

В поисковом отношении выявленные ЗНГН связаны с двумя основными типами объектов: мощные карбонатные платформы и рифогенные постройки, приуроченные к южному (Тенгиз, Кашаган) и северному (Карачаганак) борту, а также отдельные изолированные массивы и тела в карбонатных толщах КТ-II и КТ-I на восточном борту Прикаспийского бассейна [1, 10, 11].

В отношении восточного борта высокий потенциал в наращивании новых запасов нефти и газа придается региональным структурам II порядка (Жанажол-Торткольская, Темирская и Шубаркудук-Коскольская зоны валообразных поднятий, Боржер-Акжарская ступень), рис. 4. Восточная бортовая зона Прикаспийского бассейна выделяется среди остальных регионов активным изучением новых возможностей в проведении и совершенствовании новых сейсмических методов и технологий [6]. В дополнительной степени процесс активного внедрения новых методов обработки и интерпретации сейсмических данных стимулируется существованием особого поискового интереса в изучении особенностей строения и формирования резервуарной части карбонатных толщ КТ-II и КТ-I, которые являются традиционным ориентиром нефтегазопоисковых исследований в этой части бассейна и в этом плане представляются уникальными [10].

Как известно, концептуальное значение при проведении ГРР на востоке Прикаспия представляют вопросы, связанные с характером регионального залегания и прослеживания толщ КТ-II и КТ-I, факторами, контролирующими

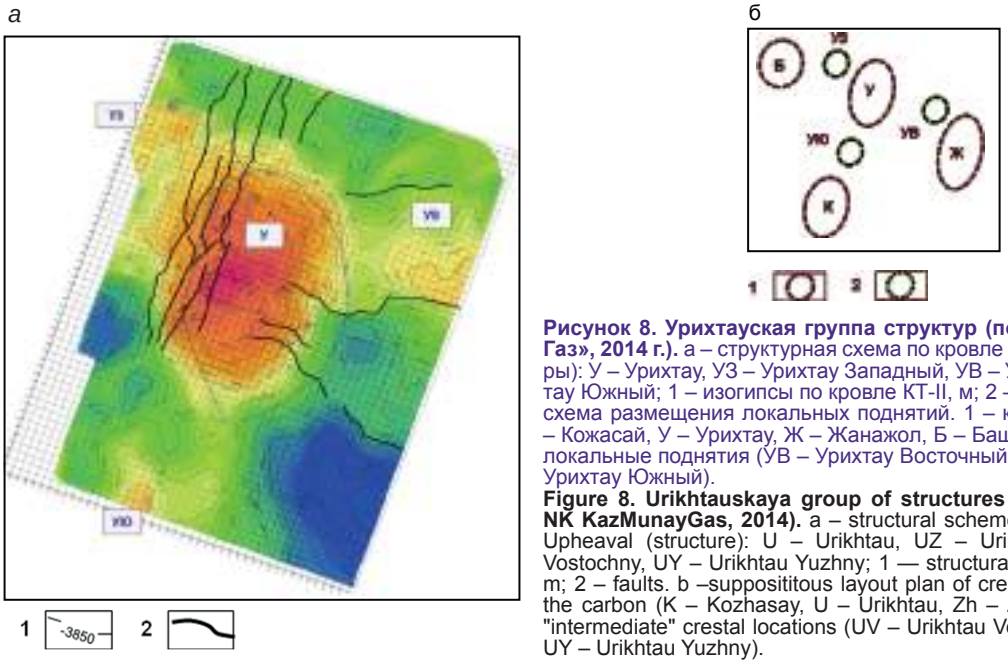



**Рисунок 8. Урихтауская группа структур (по данным АО НК «КазМунайГаз», 2014 г.).** а – структурная схема по кровле толщи КТ-II. Поднятия (структуры): У – Урихтау, УЗ – Урихтау Западный, УВ – Урихтау Восточный, УЮ – Урихтау Южный; 1 – изогипсы по кровле КТ-II, м; 2 – разломы. б – предполагаемая схема размещения локальных поднятий. 1 – крупные поднятия в карбоне (К – Кожасай, У – Урихтау, Ж – Жанажол, Б – Башенколь); 2 – «промежуточные» локальные поднятия (УВ – Урихтау Восточный, УЗ – Урихтау Западный, УЮ – Урихтау Южный).

**Figure 8. Urikhtauskaya group of structures (according to the data of AO NK KazMunayGas, 2014).** a – structural scheme of the top of the KT-II stratum. Upheaval (structure): U – Urikhtau, UZ – Urikhtau Zapadny, UV – Urikhtau Vostochny, UY – Urikhtau Yuzhny; 1 — structural contours along the top of KT-II, m; 2 – faults. b –suppositious layout plan of crestal locations. 1 – large uplifts in the carbon (K – Kozhasay, U – Urikhtau, Zh – Zhanazhol, B – Bashenkol); 2 – "intermediate" crestal locations (UV – Urikhtau Vostochy, UZ – Urikhtau Zapadny, UY – Urikhtau Yuzhny).

положение непосредственно резервуарной части внутри этих толщ (ее истинные размеры на локальных участках проявления и гипсометрия, морфология ловушек для залежей УВ).

В связи с данными внутренними особенностями своеобразие в строении обеих толщ заключается, по нашему мнению, в массивном и пластовом характере залегания и прослеживания в направлении от бортовой полосы к центральным районам бассейна [6, 10, 12]. В этом плане отметим, что в разрезе Жанажол-Торткольской зоны поднятий отмечается совместное и согласное залегание обеих толщ. Залежи УВ характеризуются в плане «структурным соответствием» (Кожасай, Жанажол, Урихтау, Трува Северная). Мощность карбонатных толщ КТ-II и КТ-I составляет 750–1150 м и 450–820 м соответственно. В юго-западном направлении она уменьшается до 150–400 м и менее [10, 11]. Контрастное структурное развитие локальных поднятий, высокий этаж продуктивности и приподнятое гипсометрическое залегание отличают Жанажол-Торткольскую зону от остальных прилегающих региональных структур.

Во-вторых, одним из ключевых вопросов при определении модели прослеживания обеих толщ в более погруженных зонах восточного обрамления и вглубь бассейна является характер и положение стратиграфической границы между карбоном и нижней пермью.

В одном случае эта граница предположительно отражает перерыв в осадконакоплении, стратиграфическая «глубина» которого от борта в сторону бассейновой части постепенно увеличивается [10]. В связи с этим верхняя толща КТ-I в плане имеет сравнительно меньшее площадное распространение лишь в контурах Жанажол-Торткольской зоны поднятий [1], придавая ей характерное контрастное и морфологически выраженное развитие. На запад от меридиана расположения поднятий Аккум, Бактыгарын (Темирская зона), Урихтау и Кожасай (Жанажол-Торткольская зона) глубина данного несогласия начинает резко возрастать и в относительно более погруженных районах (Шубаркудук-Коскольская, Боржер-Акжарская, Байганинская зона) она характеризуется максимальным развитием. Полагаем, что разрез карбона в этих относительно продвинутых к западу региональных зонах будет характеризоваться лишь карбонатами толщи КТ-II. Не исключено также, что в этой части бассейна строение данной толщи в привычном для восточной окраины слоисто-массивном облике залегания будет утрачиваться и в глубоководной части бассейна основной поисковый интерес в отложениях карбона будет связываться с аномально выраженными по амплитуде объектами (постройки, пинаклы).

В другом случае не исключается, что в направлении бассейна в более погруженной части отложения карбона (КТ-II и КТ-I) уменьшаются в толщине, сохраняя при этом стратиграфическую полноту разреза [2]. Их возрастные, четко прослеживаемые в разрезе прибортовой полосы аналоги (Жанажол-Торткольская, Темирская зона), в разрезе относительно глубоководной части бассейна имеют вид «гамма-активной» пачки по типу баженовской свиты Западной Сибири.

Поскольку данные представления на модель площадного распространения каменноугольных отложений предопределяют прогноз нефтегазоносности толщ КТ-II и КТ-I, ожидаемый тип резервуара и морфологию ловушки, повышенный интерес будут вызывать вероятные перспективные объекты в разрезе менее изученных бурением относительно погруженных внутренних районов бассейна (Шубаркудук-Коскольская, Боржер-Акжарская, Егенды-Сарыкумакская, Байганинская зона). В этих зонах по результатам исследований за последние годы в существенной мере уточнены структурные планы по сейсмическим горизонтам $П_2^1$, $П_2$ и $П_1$ (карбон–нижняя пермь). Не менее важным явилось также получение новых данных о глубокозалегающих горизонтах в девонско-нижнекаменноугольной части разреза (ОГ $П_3$) [1, 7, 13, 14]. В совокупности с новыми методами и «подходами» новые приоритеты следует связывать с глубокозалегающими палеозойскими горизонтами, в которых выделяемые в предварительном варианте объекты характеризуются крупными размерами и значительной амплитудой. Таковым является участок с поднятиями Шиликты–Шиликты Северный (Шубаркудук-Коскольская зона) и Акжар–Курсай (Боржер-Акжарская ступень) (рис. 4).

Вместе с тем изучение и выделение крупных поднятий в верхнем девоне и карбоне позволяет оценить с новых позиций строение нижнепермского терригенного комплекса, перспективность которого в условиях относительно глубоководной части бассейна с учетом новых данных нам представляется высокой [2, 3, 15].

Таким образом, появляются весьма «благоприятные предпосылки» для решения в ближайшие годы основной отраслевой задачи поисковых исследований – резкого увеличения ресурсной базы и объема ожидаемых запасов УВ. Поэтому с учетом имеющихся данных на достигнутой стадии изученности дальнейшее планомерное увеличение углеводородного потенциала, оптимальное выделение и оконтуривание крупных перспективных поисковых объектов на восточном борту Прикаспийского бассейна во многом связывается с новыми возможностями и методами в обработке и интерпретации сейсмических данных.

В соответствии с этим можно сформулировать **основные выводы по приоритетным задачам и направлениям поисковых исследований на восточном борту Прикаспийского бассейна**.

1. Применение технологий обработки и интерпретации данных сейсмических исследований (МФ, DMФ, BPC, MA ВСП) позволяет существенно расширить возможности прогноза перспективных в нефтегазоносном отношении локальных объектов как в пределах бортовых тектонических ступеней, так и в относительно продвинутых вглубь бассейна погруженных районах (Шубаркудук-Коскольская, Боржер-Акжарская зона и др.). Поисковые работы на Урихтауской группе поднятий в последние годы показали высокую плотность локальных структур за счет новых объектов в пространстве между ранее хорошо изученными крупными поднятиями в карбоне Жанажол, Кожасай, Урихтау. В результате открыты новые залежи на поднятиях Урихтау Южный и Урихтау Восточный, потенциальным для этого объектом является поднятие Урихтау Западный (рис. 8, а, б). В связи с этим авторы связывают значительное повышение эффективности прогноза новых нефтегазоносных объектов в этих зонах (в особенности на участках залегания глубоких палеозойских резервуаров) с расширением объемов полевых сейсмических исследований МОГТ-3Д, в основе которых применение отмеченных ранее новых технологий обработки и интерпретации данных.

2. Карбонатные толщи КТ-II и КТ-I характеризуются значительным и еще не полной мере реализованным углеводородным потенциалом. Достижение оптимальной методики проведения сейсмических исследований, а также работ на всем этапе от бурения до испытания объектов в колонне позволит более эффективно диагностировать внутри обеих толщ новые перспективные объекты, в том числе приуроченные в плане к значительным по площади зонам (ранее считавшиеся прогибами) между крупными поднятиями в карбоне. Недавние результаты работ на Урихтауской группе структур являются подтверждением сделанных выводов.

3. Предложенные инновационные технологии обработки и интерпретации сейсмических данных с учетом новых представлений о пространственном расположении поисковых локальных объектов в перспективной палеозойской толще позволяют уточнить главные направления исследований на восточном борту Прикаспийского бассейна на ближайшие годы:

– крупные высокоамплитудные поднятия структурного массивного типа и одиночные карбонатные постройки верхнедевонско-нижнекаменноугольного возраста в погруженной глубоководной части бассейна осадконакопления (Шубаркудук-Коскольская, Боржер-Акжарская зона, Егинды-Сарыкумакская, Байганинская зона);

– локальные объекты структурного типа, связанные с карбонатными массивами внутри толщ КТ-II и КТ-I в разрезе Темирской и Жанажол-Торткольской зоны;

– объекты неантиклинального типа в нижнепермской терригенной толще, спектр которых с учетом перспективности в этом прибортовой полосы осадконакопления и относительно глубоководной продвинутой части бассейна характеризуется довольно широким разнообразием и в полной мере еще не исследован (присклоновые ловушки, объекты конусов выноса бортовых зон и глубоководья, ловушки шлейфовой зоны и др.).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ажгалиев Д. К., Джагпаров Ж. Прогнозирование перспективных объектов в палеозойском комплексе Западного Казахстана по геофизическим данным // Изв. НАН РК. Сер. геологии и технических наук. 2018. № 3. С. 240–249.
2. Исказиев К. О., Ажгалиев Д. К., Каримов С. Г. О перспективах поисков малосернистой нефти в Казахстане // Oil and gas of Kazakhstan. 2014. № 3. С. 103–109.
3. Киинов Л. К., Исказиев К. О., Каримов С. Г., Коврижных П. Н., Шагиров Б. Б. Высокоточная инновационная аэромагнитная съемка Прикаспийской впадины // Петролеум. 2014. № 2. С. 78–81.
4. Kuandykov B. M., Obryadchikov O. S., Taskinbayev K. M. Specifics of Geological Development of Caspian Block Structure. AAPG: Search and Discovery, 2011. 10309.
5. Ескожа Б. А., Воронов Г. В. Строение подсолевого комплекса юго-востока Прикаспийской впадины // Изв. АН Казахстана. 2008. № 1. С. 315–324.
6. Исенов С. М., Караулов А. В. Технологии Мультифокусинг и Дифракционный Мультифокусинг – новый уровень геологического изучения подсолевых карбонатных резервуаров в Прикаспийской впадине // Нефтегазовая вертикаль. 2014. № 22-23-24. С. 14–15.
7. Матлошинский Н. Г. Нефтегазоносность девонских отложений Прикаспийской впадины // Нефть и газ. 2013. № 3. С. 77–91.
8. Волож Ю. А., Быкадоров В. А., Антипов М. П. и др. Особенности строения палеозойских отложений Устюрта в связи с нефтегазоносностью // Нефтегазоносные бассейны Казахстана и перспективы их освоения. 2015. С. 330–348.
9. Нуралиев Б. Б. Основа определения стратегии нефтепоисковых работ – разломная тектоника // Нефть и газ. 2008. № 1. С. 42–54.
10. Дальян И. Б., Головко А. Ю., Клоков Ю. В. О погребенных палеозойских рифах на востоке Прикаспия // Научно-технологическое развитие нефтегазового комплекса: материалы междунар. науч. Надировских чтений. Атырау, 2003. С. 35–45.
11. Акчулаков У. А. Новая ресурсная база углеводородов Республики Казахстан и пути возможной их реализации // Нефтегазоносные бассейны Казахстана и перспективы их освоения (ОО КОНГ). Алматы, 2015. 476 с.
12. Обрядчиков О. С., Горюнова Л. Ф. Особенности геологического строения карбонатных массивов при прогнозе месторождений углеводородов Прикаспийской впадины // Труды РГУ нефти и газа имени И. М. Губкина: сборник науч. статей по проблемам нефти и газа. 2016. № 4 (285). С. 32–42.
13. Ажгалиев Д. К. Девонские отложения – перспективное направление поисковых работ на нефть и газ в Прикаспийском бассейне // Георесурсы. 2017. № 2. С. 111–116. http://doi.org/10.18599/grs.19.2.4
14. Таскинбаев К. М. О генезисе вдоль бортовых подсолевых структур юга и востока Прикаспийской впадины // Нефть и газ. 2007. № 4. С. 3–14.
15. Турков О. С. Присклоновые моноклинальные залежи – новый тип скопления углеводородов в подсолевых отложениях Прикаспийской впадины / Геолог, возвышенный трудом. (ОО КОНГ). Алматы, 2016. С. 232–242.

*Статья поступила в редакцию 9 октября 2018 г.*

УДК 551.24: 553.982 https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-1-48-59

# New opportunities for processing and interpreting seismic data in estimating the viability of local objects

**Dulat Kalimovich AZHGALIEV**[1,*],
**Serik Mukhambetovich ISENOV**[2,**],
**Samat Galymzhanovich KARIMOV**[3,***]

[1]LLP «Company «Nedra-Engineering», Almaty, Kazakhstan
[2]LLP «Geomedzh KZ», Almaty, Kazakhstan
[3]L. N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

***Relevance.*** An estimation of the oil and gas potential of the promising targets along with a clarification of the nature and characteristics of their internal structure necessitates the improvement of new trends in the quality of seismic survey results. Methods of seismic exploration are the main information base in the preparation and justification of promising objects, determining the optimal location of the project deep wells. In this regard, the use of innovative technologies in the processing and interpretation of seismic data (2D and 3D – CDP method) at the modern stage of the study is of great importance.
***Purpose and objectives.*** It is necessary to estimate some possibilities for the effective application of innovative technologies using typical areas within the Caspian (eastern flank zone) and Shu-Sarysusky (Moiynkumskaya depression) basin as examples to highlight promising objects in the Paleozoic stratum. The task is to justify the use of new technologies. There are three main areas for this: optimization of parameters of field work at the stage of raw information collection, development and introduction of new software systems, optimization of interpretation technologies and constructing models.
***Results of application.*** These methods are focused on objects that are accompanied by increased complexity and conditions of occurrence. Their application is considered in more detail at the facilities at the eastern side of the Pre-Caspian basin. With this in mind, the features of regional and areal tracking of the main objects oriented to carbonate strata KT-II and KT-I are given. The latest results and drilling data concerning the Zhanazhol-Tortkolskaya uplift zones, Borzher-Akzharskaya bench, Ostansuksky downfold (Akzhar Vostochny, Zhanazhol, Urikhtau, Tuzkum, Alibekmola) are presented. Separately, the capabilities of seismic technologies in combination with GIS data are shown in order to efficiently identify potential objects for testing. The accumulated experience of seismic surveys and the costs incurred are clarified; it contributes to more effective approaches in their application, including high-resolution seismic exploration, multi-azimuth VSP survey, multifocusing, and diffraction multifocusing.
***Conclusions.*** New promising objects (providing the availability of innovative technologies for their detailed study ) are projected in relatively remote areas of the eastern side zone (Shubarkuduk-Koskolskaya and Borzher-Akzharskaya uplift zones). The remaining significant and still unrealized potential of the QD-II and CT-I strata is substantiated. The possibilities of expanding the range of areas of oil prospecting work for the study of promising objects and uplifts (Upper Devonian – Lower Carbon, Middle – Upper Carbon, Lower Permian) are considered.

*Keywords:* Pre-Caspian basin, eastern side, carbonate members KT-II and KT-I, Paleozoic complex, 2D / 3D seismic surveys, data processing and interpretation, subsalt sediments, oil and gas prospects, local uplifts, carbonate rocks, sedimentation, hydrocarbons, ways of geological prospecting work.

## REFERENCES

1. Azhgaliev D. K., Dzhagparov Gh. 2018, Forecasting of promising objects in the Paleozoic complex of Western Kazakhstan according to geophysical data. *Izvestiya NAN RK* [Bulletin of NAN, Republic of Kazakhstan]. Geology and technical sciences, no. 3, pp. 240–249. (*In Russ.)*
2. Iskaziyev K .O., Azhgaliev D. K., Karimov S. G. 2014, About the prospects for the search for low-sulfur oil in Kazakhstan. *Oil and gas of Kazakhstan*, no. 3, pp. 103–109. (*In Russ.)*
3. Kiinov L.K., Iskaziyev K.O., Karimov S. G., Kovrizhnykh P. N., Shagirov B. B. 2014, High-precise innovative aeromagnetic survey of the Peri-Caspian Depression. *Petroleum*, no. 2, pp. 78–81. (*In Russ.)*
4. Kuandykov B. M., Obryadchikov O. S., Taskinbayev K. M. 2011, Specifics of Geological Development of Caspian Block Structure. AAPG: Search and Discovery, 10309.
5. Escozha B. A., Voronov G. V. 2008, The structure of the subsalt complex of the southeast of the Peri-Caspian Depression. *Izvestiya NAN RK* [Bulletin of NAN, Republic of Kazakhstan], no. 1, pp. 315–324. (*In Russ.*)
6. Isenov S. M., Karaulov A. V. 2014, Technologies of Multifocusing and Diffraction Multifocusing – a new level of geological study of subsalt carbonate reservoirs in the Peri-Caspian Depression. *Neftegazovaya vertikal'* [Oil and Gas Vertical], no. 22-23-24, pp. 14–15. (*In Russ.*)
7. Matloshinsky N.G. 2013, Oil and gas potential of the Devonian sediments of the Peri-Caspian Depression. *Neft' i gaz* [Oil and gas], no. 3, pp. 77–91. (*In Russ.*)
8. Volozh Yu. A., Bykadorov V. A., Antipov M. P. et al. 2015, *Osobennosti stroyeniya paleozoyskikh otlozheniy Ustyurta v svyazi s neftegazonosnost'yu* [Features of the structure of the Paleozoic Ustyurt deposits in connection with the oil and gas potential]. In: *Neftegazonosnye basseyny Kazahstana I perspektivy ikh osvoeniya* [Oil and gas bearing basins of Kazakhstan and the prospects for their development], pp. 330–348.
9. Nuraliev B. B. 2008, The basis for determining the strategy of oil prospecting work – fault tectonics. *Neft' i gaz* [Oil and gas], no. 1, pp. 42–54. (*In Russ.*)
10. Dalyan I. B., Golovko A. Yu., Klokov Yu. V. 2003, *O pogrebennykh paleozoyskikh rifakh na vostoke Prikaspiya* [About the buried Paleozoic reefs in the east of the Caspian Sea region]. Scientific and technological development of the oil and gas complex: proceedings of the international scientific Nadirovskie readings. Atyrau, pp. 35–45.
11. Akchulakov U. A. 2015*, Novaya resursnaya baza uglevodorodov Respubliki Kazakhstan i puti vozmozhnoy ikh realizatsii* [New resource base of hydrocarbons of the Republic of Kazakhstan and the ways of their possible implementation]. Oil and gas bearing basins of Kazakhstan and the prospects for their development (OO KONG). Almaty, 476 p.
12. Obryadchikov O. S., Goryunova L. F. 2016, *Osobennosti geologicheskogo stroyeniya karbonatnykh massivov pri prognoze mestorozhdeniy uglevodorodov Prikaspiyskoy vpadiny* [Features of the geological structure of carbonate massifs while predicting of hydrocarbon deposits of the Peri-Caspian Depression]. Writings of the University of Oil and Gas named after I. M. Gubkin: collection of papers on oil and gas issues, no. 4 (285), pp. 32–42.
13. Azhgaliev D. K. 2017, Devonian sediments is a strategic pathway of exploration for oil and gas in the Pre-Caspian Basin. *Georesursy* [Georesources], vol. 19, no 2, pp. 111–116. http://doi.org/10.18599/grs.19.2.4

* ✉ dulat.azhgaliev@gmail.com
http://orcid.org/0000-0001-9770-0473

14. Taskinbaev K. M. 2007, About the genesis along the flank subsalt structures of the South and East of the Pre-Caspian Depression. *Neft' i gaz* [Oil and gas], no. 4, pp. 3–14. (*In Russ*.)
15. Turkov O. S. 2016, *Prisklonovyye monoklinal'nyye zalezhi – novyy tip skopleniya uglevodorodov v podsolevykh otlozheniyakh Prikaspiyskoy vpadiny* [Slope monoclinal deposits - a new type of hydrocarbon accumulation in subsalt sediments of the Pre-Caspian Depression]. In: A geologist of great labor. (OO KONG). Almaty, pp. 232–242.

*The article was received on October 9, 2018*

УДК 549.08 https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-1-60-66

# Морфология и внутреннее строение природных и техногенных железооксидных микросфер

**Михаил Сергеевич ГЛУХОВ***

Казанский федеральный университет, Россия, Казань

***Актуальность работы:*** происхождение железооксидных микросфер связано с космическими, земными (абиогенные, биогенные) и техногенными процессами. Изучение подобных объектов важно для познания минералообразования на Земле, строения и состава космических тел, роли техногенных процессов в образовании новых минералов. Обнаружение микросфер в осадочных толщах помогает дополнить методы корреляции разнофациальных толщ на глобальном, региональном и местном уровнях, а также помогает в поисках стратифицируемых полезных ископаемых.
***Цель работы:*** изучение особенностей внутреннего строения природных и техногенных железооксидных микросфер. Основные задачи: изучение порового пространства и возможных текстур, проверка наличия дифференциации вещества.
***Методология исследования:*** Все изучаемые объекты отбирались из порошковых проб с помощью постоянного и неодимового магнитов. С помощью микротомографии изучены отобранные из магнитной фракции железооксидные микросферы из импактитов кратера Рис, из верхнепалеозойских пород востока Восточно-Европейской платформы и Предуральского прогиба, и техногенные (сварочные) микросферы. Те же объекты в полированных срезах исследованы с помощью сканирующей электронной микроскопии.
***Результаты.*** Изучение объектов рентгеновской компьютерной микротомографией в двухмерном и трехмерном пространстве показало различия в пустотном пространстве техногенных и природных микросфер. Различия подтверждены электронной микроскопией. Дифференциация вещества в железооксидных микросферах подтверждена томографическими исследованиями и электронной микроскопией. Для внутренней части железооксидных микросфер из импактитов кратера Рис изучен химический состав. Примитивность химического состава подтверждает их космическое происхождение.
***Выводы.*** Совместное использование традиционного подхода с прецизионными методами приближает расшифровку генезиса микрообъектов.

*Ключевые слова:* железооксидные микросферы, микротомография, электронная микроскопия, пустотное пространство, дифференциация вещества.

## Введение

Масштабы находок железооксидных (суммарное содержание кислорода и железа 96–100 %) микросфер обширны: древние осадочные породы, аллювий современных рек, пустыни, дно морей и океанов, снежный покров Антарктиды, техногенные отложения [1–10]. Происхождение подобных образований вызывает споры в научном сообществе: рассматриваются космические, техногенные, земные абиогенные и биогенные гипотезы [11, 4–14, 15, 16, 22]. При этом изучение железооксидных микросфер с помощью современных прецизионных методов (включая и неразрушающие) способно дать новую важную информацию о минералообразовании на Земле, о строении и составе космических тел, о роли техногенных процессов в образовании новых минералов. Кроме того, нахождение микросфер в осадочных толщах может выступать дополнительным инструментом при корреляции разнофациальных толщ и поисках стратифицируемых полезных ископаемых [17].

Ранее исследователи для обоснования происхождения железооксидных микросфер использовали ряд параметров. Так, например, металлический блеск, идеальная сферичность, наличие таких элементов-примесей, как никель и хром, отсутствие титана характерны для космических микросфер [12, 18, 19]. Природные и техногенные образования имеют значительно более широкий набор элементов-примесей – до 10–15 [5, 13, 15, 16, 20, 22]. Текстурная поверхность, включая и внутреннюю, полированных срезов, в виде шестигранников, треугольников, дендритов, клубков и мозговидной формы в основном присуща космическим и природным микросферам и значительно реже – техногенным [5, 13, 15, 16, 18]. Отсутствие обохренной поверхности и наличие устойчивой к окислению корочки характерно для космических и некоторых природных микросфер [19]. Анализ литературы позволил разделить природные «сферулы», образованные в земных условиях без техногенного влияния, на эндогенные, возникшие в процессе застывания магмы или из продуктов извержения вулканов [5, 6] и биогенные [11, 14]. Для эндогенных характерна вытянутая, приплющенная и каплевидная форма, для биогенных – близкая к сферической. Текстурная поверхность биогенных сферул гладкая или комковатая, тогда как в эндогенных микросферах текстурная поверхность разнообразная.

Настоящее исследование посвящено поиску дополнительных характеристик железооксидных микросфер различного генезиса. Объектами исследования явились природные магнитные микросферы, извлеченные при помощи постоянного и неодимового магнитов из порошкообразных проб импактного кратера Рис (нем. Nördlinger Ries), Германия, из керна скважин и обнажений востока Восточно-Европейской платформы и Предуральского прогиба, а также объекты техногенного происхождения – микросферы от сварки (рис. 1–3). К основным задачам данного исследования относилось изучение внутреннего строения микросфер в полированных срезах и порового пространства микросфер. Для этого применялись электронные микроскопы Phillips XL-30 и Vega 3 Tescan sbu, оснащенные энергодисперсионными спектрометрами, при ускоряющем напряжении 20–25 кэВ и рабочем отрезке 8,9–15 мм; глубина зондирования составляла 1 мкм; точность измерения 0,1–1 %. На микроскопе Phillips XL-30 (КФУ, аналитик Б. М. Галиуллин) образцы изучены без напыления с использованием низкого вакуума; на микроскопе Vega 3 Tescan sbu (ИМин УрО РАН, аналитик И. А. Блинов) проводилось напыление образцов углеродом. Неразрушающие (неинвазивные) исследования порового пространства микросфер проводились на рентгеновском микротомографе Phoenix V|tome|X S 240 с нанофокусной рентгеновской трубкой с максимальным ускоряющим напряжением 180 кВт и мощностью 15 В (КФУ, аналитик Е. О. Стаценко).

* ✉ gluhov.mixail2015@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0002-5075-7066

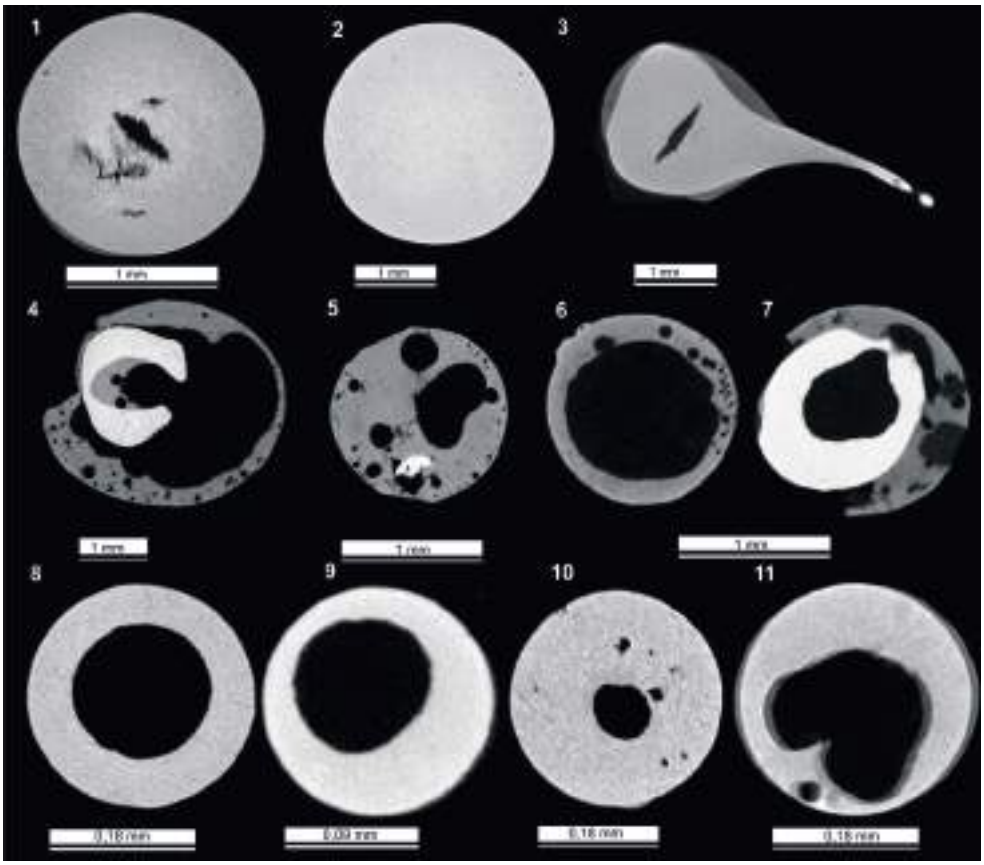



**Рисунок 1. Рентгенотомографический срез двухмерного изображения железооксидных микросфер.** 1–7 – сварочные шарики; 8 – микросфера из разреза Мечетлино, Предуральский прогиб (нижняя пермь, кунгурский ярус); 9, 10 – микросферы из кратера Рис, Германия; 11 – микросфера из керна Усть-Черемшанской скважины, Республика Татарстан (глубина 1008–1013 м, средний карбон, московский ярус).
**Figure 1. X-ray tomographic section of the two-dimensional image of iron oxide microspheres.** 1–7 – wrought balls; 8 – microsphere from the Mechetlino open-pit mine, Pre-Ural fore deep (Lower Permian, Kungur stage); 9, 10 – microspheres from the Ris crater, Germany; 11 – microsphere from the core of the Ust-Cheremshan well, Republic of Tatarstan (depth is 1008–1013 m, Moscovian Stage).

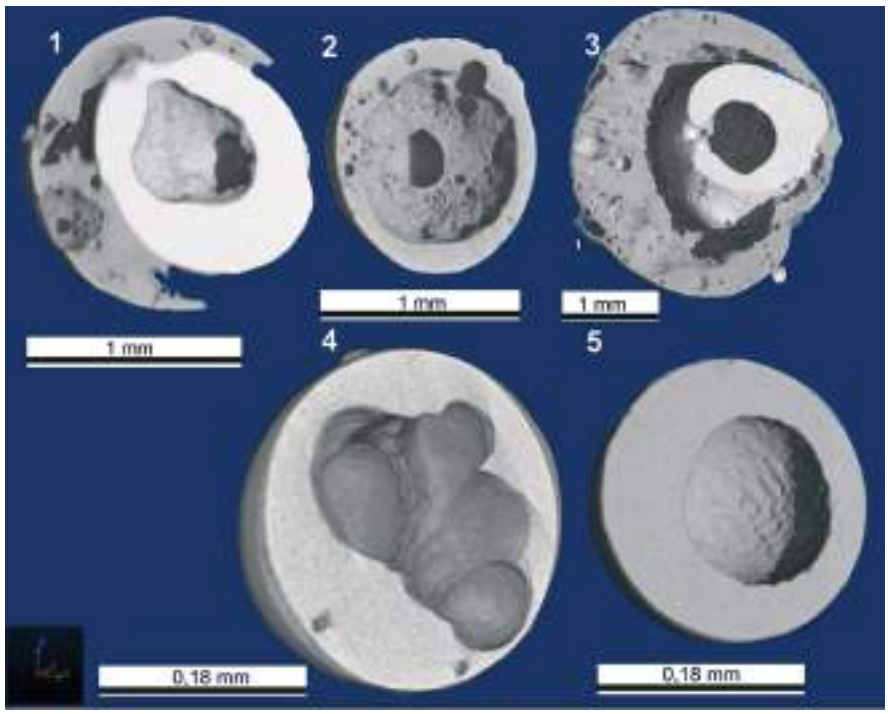



**Рисунок 2. Рентгенотомографический срез трехмерного изображения железооксидных микросфер.** 1–3 – сварочные шарики; 4 – микросфера из керна Усть-Черемшанской скважины (см. рис. 1, объект 11); 5 – микросфера из отложений разреза Мечетлино (см. рис. 1, объект 8).
**Figure 2. X-ray tomographic section of the three-dimensional image of iron oxide microspheres.** 1–3 – wrought balls; 4 – microsphere from the core of the Ust-Cheremshan well (see Fig. 1, object 11); 5 – microsphere from sediments of the Mechetlino open-pit mine (see Fig. 1, object 8).

**Химический состав внутренней части микросфер из кратера Рис.**
**The chemical composition of the inner part of microspheres from the Ris crater.**

| Образец | Номер спектра | Элементы, вес. % | | | | | Сумма |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Fe | O | Si | Al | Ca | |
| Рис-1 | 1 | 63,08 | 31,85 | 3,51 | 0,35 | 1,21 | 100 |
| (см. рис. 1, объект 10; рис. 3, объект 8) | 2 | 59,56 | 35,91 | 3,28 | 0,44 | 0,81 | 100 |
| | 3 | 67,88 | 30,59 | 1,08 | 0,45 | – | 100 |
| Рис-2 | 1 | 70,29 | 29,28 | 0,43 | – | – | 100 |
| (см. рис. 1, объект 9; рис. 3, объект 7) | 2 | 70,34 | 29,28 | 0,38 | – | – | 100 |
| | 3 | 70,22 | 29,20 | 0,58 | – | – | 100 |
| | 4 | 70,31 | 29,26 | 0,44 | – | – | 100 |

Примечание. Прочерк – не обнаружено.

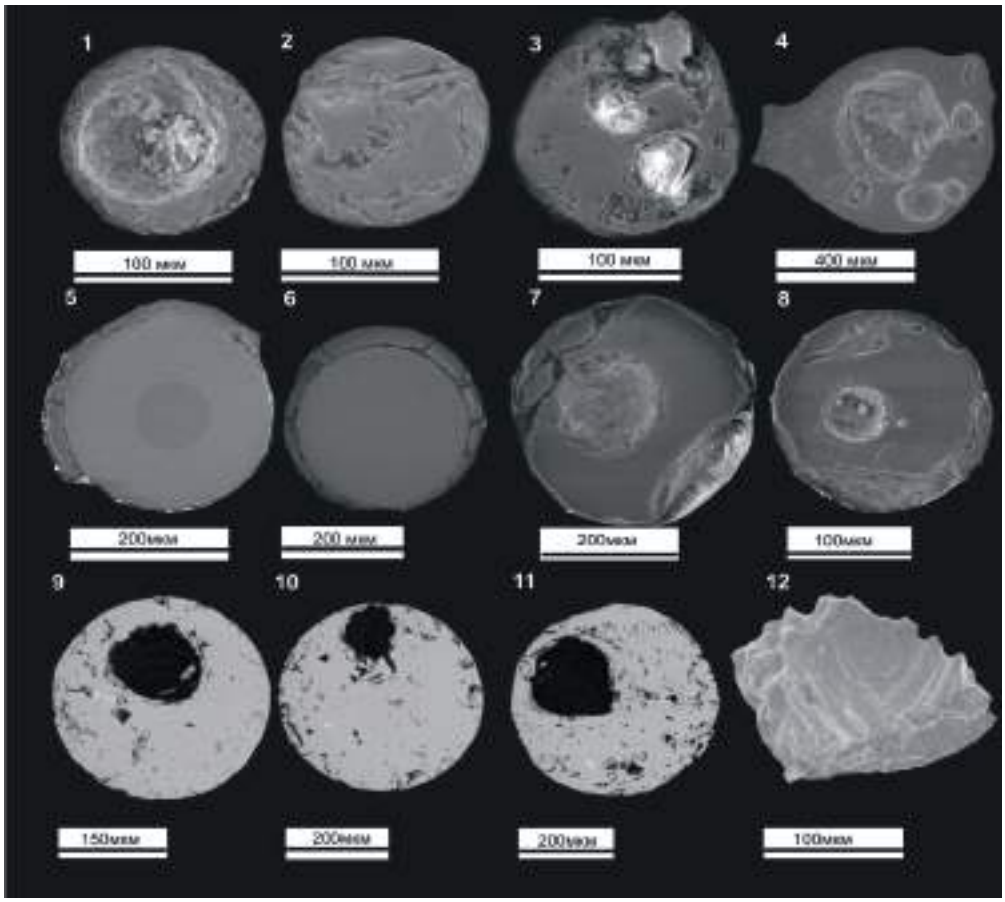



**Рисунок 3. Полированные срезы железооксидных микросфер.** 1–3 – из керна Усть-Черемшанской скважины; 4–6 – сварочные шарики; 7, 8 – из кратера Рис; 9–11 – из керна скважины месторождения Карачаганак (Прикаспийская впадина, плато Устюрт, Казахстан); 12 – обломок микросферы из отложений разреза Мечетлино, Предуральский прогиб.
**Figure 3. Polished sections of iron oxide microspheres.** 1–3 – from the core of the Ust-Cheremshan well; 4–6 – wrought balls; 7, 8 – from the Ris crater; 9–11 – from the core of the well of the Karachaganak field (Peri-Caspian Depression, Ustyurt Plateau, Kazakhstan); 12 – the fragment of microsphere from deposits of the Mechetlino open-pit mine, Pre-Ural fore deep.

## Исследования

В ходе выполненных микротомографических исследований установлены различия в поровом пространстве микросфер. Так, микросферы техногенного генезиса, образовавшиеся в процессе сварочных работ, имеют большое количество отдельных, не связанных между собой пор (рис. 1, объекты 4–7). Иногда поры отсутствуют (цельные микросферы, рис. 1, объект 2) или имеются веретенообразные трещины (рис. 1, объект 1). Микросферы природного и космического происхождения обладают пустотным пространством в центральной части (рис. 1, объекты 8–11). Иногда форма пустот близка к сферичной (рис. 1, объекты 8, 9); встречаются пустоты более сложной формы, возникающие при слиянии нескольких пор (рис. 1, объекты 10, 11). Трехмерные (3D) изображения микросфер (рис. 2) дополнительно визуализируют информацию по поровому пространству. Электронно-микроскопическое исследование порового пространства микросфер в полированных срезах подтвердило наличие несвязанных газовых пор в техногенных микросферах (рис. 3, объект 4).

Сравнение микротомографии и результатов электронной микроскопии позволило установить наличие дифференциации вещества микросфер, что выражается в изменении плотности от центра к внешней оболочке. На томографиче-

ском снимке плотностные характеристики показаны контрастом цвета от серого к белому: от более низкой плотности вещества к более высокой плотности (рис. 1, объекты 3–5, 7, 11; рис. 2, объекты 1, 3, 4). Подобная дифференциация находит подтверждение и в электронно-микроскопических снимках, где отчетливо проявлена корочка (рис. 3, объект 6), а иногда и ядро (рис. 3, объект 5). Среди микросфер имело значение исследование капли застывшего расплава, так как изначально все микросферы, являясь незастывшим расплавом, формируются из капли. Так, дифференциация вещества внутри «сварочной» капли (рис. 1, объект 3) показывает, что хвостовая часть более светлая по сравнению с головной частью, что говорит о наличии более плотного веществе в хвосте.

Химический состав большинства объектов изучался ранее [7–9, 17–19]. Здесь впервые представлен состав внутренней части двух железооксидных микросфер из импактного кратера Рис (таблица). Главными элементами микросфер являются железо и кислород (суммарно до 99,62 %), элементами-примесями – кремний, алюминий и кальций. При этом различие в химическом составе двух микросфер обусловлено, по всей вероятности, разницей в их минеральном составе: в образце Рис-1 преобладает магнетит, а в образце Рис-2 – вюстит.

Результаты томографических и микроскопических исследований показывают, что железооксидные микросферы часто имеют разнообразное внутреннее пустотное пространство. Поры, возникшие в техногенных микросферах, могут являться результатом образования газов [20]. Полости в природных земных и космических микросферулах могут быть связаны с выделением газов или жидкого расплава [9, 16, 18]. Появление трещин в центре сварочных шариков, по-видимому, связано со слишком высокими температурами нагрева и быстрым остыванием [21]. Химический и минеральный состав железооксидных микросфер из импактного кратера Рис подтверждает их внеземное происхождение.

## Заключение

Таким образом, совместное использование при исследовании железооксидных микросфер традиционного подхода (изготовление полированных срезов) и прецизионных методов (микротомография, электронная микроскопия и микрозондовый анализ) позволяет получить новые данные по их составу, дифференциации внутреннего строения, что приближает расшифровку генезиса необычных объектов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Булат С. А., Ежов В. Ф., Цельмович В. А. Первое обнаружение железоникелевых микрометеоритов в приснежном покрове Центральной Восточной Антарктиды, станция Восток // Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле: Девятнадцатая междунар. конф. (Москва, 24–26, Борок, 28 сент. 2018 г.). М., 2018. С. 45–48.
2. Вернадский В. И. О необходимости организованной научной работы по космической пыли // Проблемы Арктики. 1941. № 5. С. 55–64.
3. Дивари Н. Б. О сборе космической пыли на леднике Туюк-Су // Метеоритика. М.: Изд. АН СССР, 1948. Вып. IV. С. 120–122.
4. Грачев А. Ф. К вопросу о природе космической пыли в осадочных породах // Физика Земли. 2010. № 11. С. 3–13.
5. Карпов Г. А., Мохов А. В. Микрочастицы самородных металлов, сульфидов и оксидов в андезитовых пеплах Карымского вулкана // Вулканология и сейсмология. 2010. № 3. С. 19–35. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=15109585
6. Кориневский В. Г., Кориневский Е. В. Магнитные микросферы в карбонатитах Южного Урала // Металлогения древних и современных океанов-2018. Вулканизм и рудообразование. Миасс: Ин-т минералогии УрО РАН, 2012. С. 225–228.
7. Сунгатуллин Р. Х., Сунгатуллина Г. М., Закиров М. И., Цельмович В. А., Глухов М. С., Бахтин А. И., Осин Ю. Н., Воробьев В. В. Микросферы космического происхождения в каменноугольных породах разреза Усолка, Предуральский прогиб // Геология и геофизика. 2017. Т. 58, № 1. С. 74–85. https://dx.doi.org/10.15372/GiG20170106
8. Murray I. On the distribution of volcanic debris over the floor of ocean // Proc. Roy. Soc. Edinburg. 1878. Vol. 9. P. 247–261. https://doi.org/10.1017/S0370164600032181
9. Sungatullin R. Kh., Glukhov M. S., Galiullin B. M., Sungatullina G. M., Bakhtin A. I., Vishnykov A. K., Vafina M.S., Gusev A. V., Kuzina D. M. First Finds of Space Microspheres in the Evaporites of the Urals Foredeep, Russia // Meteoritics & Planetary Science. 2018. Vol. 53, issue S1. P. 6291.
10. Sungatullin R., Glukhov M., Galiullin B., Statsenco E., Sungatullina G. Cosmic Microspheres from the Deposits of the Moscovian Stage of the Eastern Part of the Russian Plate // Advances in Devonian, Carboniferous and Permian Research: Stratigraphy, Environments, Climate and Resources: proceedings Kazan Golovkinsky Stratigraphic Meeting (Kazan, Russian Federation, 19–23 Sept. 2017). Bologna: Filodiritto Publisher, 2018. P. 431–439.
11. Бортников Н. С., Новиков В. М., Боева Н. М., Жухлистов А. П., Гендлер Т. С., Жегалло Е. А., Соболева С. В. Первая находка биогенного наносидерита в окисленных железистых кварцитах Лебединского месторождения КМА // ДАН. 2016. Т. 466, № 5. С. 569–573. https://doi.org/10.7868/S0869565216050182
12. Корчагин О. А. Присутствие металлических микросфер и микрочастиц в раннем сеномане Крыма – «космическое пылевое событие» // ДАН. 2010. Т. 431, № 6. С. 783–787. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=13857258
13. Макаров А. Б., Осовецкий Б. М., Антонова И. А. Магнитные сферулы из почв вблизи шлакового отвала Нижнетагильского металлургического комбината // Изв. УГГУ. 2017. Вып. 4(48). С. 42–45. https://doi.org/10.21440/2307-2091-2017-4-42-45
14. Новиков В. М., Бортников Н. С., Боева Н. М., Жухлистов А. П., Зайцева Л. В., Новакова А. А., Кустов Ю. Е., Кочнев В. Э. Биогенный гематит богатых железных руд Беленихинского месторождения Белгородского района КМА // Вестник ВГУ. Сер. «Геология». 2017. № 4. С. 58–62.
15. Bourliva A., Papadopoulou L., Aidona E., Giouri K., Simeonidis K., Vourlias G. Characterization and geochemistry of technogenic magnetic particles (TMPs) in contaminated industrial soils: Assessing health risk via ingestion // Geoderma. 2017. Vol. 295. P. 86–97. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.02.001
16. Glukhov M. S., Sungatullin R. Kh., Galiullin B. M., Sungatullina G. M., Bakhtin A. I., Gusev A. V., Kuzina D. M. Metallic microspheres of cosmic and technogenic origin // Meteoritics & Planetary Science. 2018. Vol. 53, issue S1. P. 6202.
17. Сунгатуллин Р. Х., Сунгатуллина Г. М., Глухов М. С., Осин Ю. Н., Воробьев В. В. Возможности использования космических микросфер при корреляции нефтегазоносных отложений // Нефтяное хозяйство. 2015. № 2. С. 16–19. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=22996109
18. Сунгатуллин Р. Х., Бахтин А. И., Цельмович В. А., Сунгатуллина Г. М., Глухов М. С., Осин Ю. Н., Воробьев В. В. Железо-никелевые микрочастицы в осадочных породах как индикаторы космических процессов // Учен. записки Казан. ун-та. Естественные науки. 2015. Т. 157. Кн. 3. С. 102–118.
19. Fredriksson K., Gowdy R. Meteoritic debris from the Southern California desert // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1963. Vol. 27 (3). P. 241–243. https://doi.org/10.1016/0016-7037(63)90025-5
20. Сокол Э. В., Максимова Н. В., Нигматулина Е. Н., Френкель А. Э. Природа, химический и фазовый состав энергетических зол челябинских углей. Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2001. 107 с.

21. Бернштейн М. Л. Атлас дефектов стали. М., 1979. 188 с.
22. Осовецкий Б. М., Меньшикова Е. А. Природно-техногенные осадки. Пермь: ПГУ, 2006. 209 с.
23. Balabanov Yu. P., Sungatullin R. Kh., Sungatullina G. M., Kosareva L. R., Glukhov M. S., Yakunina P. G., Zhernenkov A. O., Antonenko V. V., Churbanov A. A. Magnetostratigraphy of the Reference Sections of the Cisuralian Series (Permian System) // Recent Advances in Rock Magnetism, Environmental Magnetism and Paleomagnetism: International Conference on Geomagnetism, Paleomagnetism and Rock Magnetism (Kazan, Russia). Cham, Switzerland: Springer Geophysics, 2019. P. 317–342.

*Статья поступила в редакцию 20 ноября 2018 г.*

УДК 549.08 https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-1-60-66

# The morphology and internal structure of natural and man-made iron oxide microspheres

**Mikhail Sergeevich GLUKHOV***

Kazan Federal University, Kazan, Russia

***Relevance of the work:*** The origin of iron oxide microspheres is associated with cosmic, terrestrial (abiogenic, biogenic) and technogenic processes. The study of such objects is important for the knowledge of mineral formation on Earth, the structure and composition of cosmic bodies, the role of man-made processes in the formation of new minerals. The detection of microspheres in sedimentary strata helps to complement the methods of correlation of different facies strata at the global, regional and local levels and helps in the search for stratified minerals as well.
***Purpose of the work:*** study of features of the internal structure of natural and man-made iron oxide microspheres. Main tasks: study of pore space and possible textures, check for the presence of differentiation of a substance.
***Research methodology:*** All studied objects were taken from powdered samples using a permanent and neodymium magnet. With the help of microtomography, iron oxide microspheres selected from the magnetic fraction from impactites of the Ris crater (from the Upper Paleozoic rocks of the East European Platform and the Pre-Ural fore deep), and man-made (welding) microspheres were studied. The same objects in polished sections were examined using scanning electron microscopy.
***Results.*** The study of X-ray computer microtomography objects in two-dimensional and three-dimensional space showed differences in the voids of technogenic and natural microspheres. The differences are confirmed by electron microscopy. The differentiation of the substance in iron oxide microspheres is confirmed by tomographic studies and electron microscopy. Chemical composition was studied for the inner part of iron oxide microspheres from the impactites of the Ris crater. The primitiveness of the chemical composition confirms their cosmic origin.
***Conclusions.*** The combined use of the conventional approach with precision methods approximates the decoding of the genesis of microobjects.

*Keywords:* iron oxide microspheres, microtomography, electron microscopy, voids, substance differentiation.

## REFERENCES

1. Bulat S. A., Ezhov V. F., Tsel'movich V. A. 2018, *Pervoye obnaruzheniye zhelezonikelevykh mikrometeoritov v prisnezhnom pokrove Tsentral'noy Vostochnoy Antarktidy, stantsiya Vostok* [The first detection of iron-nickel micrometeorites in the subniveal cover of Central East Antarctic Continent, Vostok station]. Physical, chemical and petrophysical studies in earth sciences: The Nineteenth International Conference (Moscow, 24–26, Borok, 28 Sep. 2018). Moscow, pp. 45–48.
2. Vernadsky V. I. 1941, About the need for an organized scientific work on cosmic dust. *Problemy Arktiki* [Arctic Research], no. 5, pp. 55–64. (*In Russ.*)
3. Divari N. B. 1948, About the collection of cosmic dust at the Tuyuk-Su glacier. *Meteoritika* [Meteoritics]. Moscow, Issue IV, pp. 120–122. (*In Russ.*)
4. Grachev A. F. 2010, About the nature of cosmic dust in sedimentary rocks. *Fizika Zemli* [Physics of the Solid Earth], no. 11, pp. 3–13. (*In Russ.*)
5. Karpov G. A., Mokhov A. V. 2010, Small particles of native metals, sulphides and oxides in andesitic ashes of the Karymsky volcano. *Vulkanologiya i seysmologiya* [Journal of Volcanology and Seismology], no. 3, pp. 19–35. (*In Russ.*). URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=15109585
6. Korinevsky V. G., Korinevsky E. V. 2012, Magnetic microspheres in carbonatites of the Southern Urals. *Metallogeniya drevnikh i sovremennykh okeanov* [Metallogeny of ancient and modern oceans – 2018]. Volcanism and ore formation. Miass, pp. 225–228.
7. Sungatullin R. Kh., Sungatullina G. M., Zakirov M. I., V. Tsel'movich V. A. Glukhov M. S., Bakhtin A. I., Osin Yu. N., Vorob'ev V. V. 2017, Microspheres of cosmic origin in the Carboniferous rocks of the Usolka section, Pre-Ural fore deep. *Geologiya i geofizika* [Geology and Geophysics], vol. 58, no. 1, pp. 74–85. (*In Russ.)* https://dx.doi.org/10.15372/GiG20170106
8. Murray I. 1876, On the distribution of volcanic debris over the floor of ocean. *Proceedings of the Royal Society of Edinburgh*, vol. 9, pp. 247–261. https://doi.org/10.1017/S0370164600032181
9. Sungatullin R. Kh., Glukhov M. S., Galiullin B. M., Sungatullina G. M., Bakhtin A. I., Vishnykov A. K., Vafina M.S., Gusev A. V., Kuzina D. M. 2018,First Finds of Space Microspheres in the Evaporites of the Urals Foredeep, Russia First Finds of Space Microspheres in the Evaporites of the Urals Foredeep, Russia. *Meteoritics & Planetary Science*, vol. 53, issue S1, p. 6291.
10. Sungatullin R., Glukhov M., Galiullin B., Statsenco E., Sungatullina G. 2018, Cosmic Microspheres from the Deposits of the Moscovian Stage of the Eastern Part of the Russian Plate. Advances in Devonian, Carboniferous and Permian Research: Stratigraphy, Environments, Climate and Resources: proceedings Kazan Golovkinsky Stratigraphic Meeting (Kazan, Russian Federation, 19–23 Sept. 2017. Bologna: Filodiritto Publisher, pp. 431–439.
11. Bortnikov N. S., Novikov V. M., Boeva N. M., Zukhlistov A. P., Gendler T. S., Zhegallo E. A., Soboleva S. V. 2016, The first finding of biogenic nanosiderite in oxidized ferruginous quartzites of the Lebedinsky deposit KMA. *Doklady Akademii nauk* [Doklady Earth Sciences], vol. 466, no. 5, pp. 569–573. (*In Russ.)*
12. Korchagin O. A. 2010, The availability of metallic microspheres and small particles in the early Cenomanian of Crimea – "cosmic dust event". *Doklady Akademii nauk* [Doklady Earth Sciences], vol. 431, no. 6, pp. 783–787. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=13857258
13. Makarov A. B., Osovetsky B. M., Antonova I. A. 2017, Magnetic spherules from the soil near the ash heap of the Nizhny Tagil Iron and Steel Works. *Izvestiya UGGU* [News of the Ural State Mining University], issue 4 (48), pp. 42–45. (*In Russ.*) https://doi.org/10.21440/2307-2091-2017-4-42-45
14. Novikov V. M., Bortnikov N. S., Boeva N. M., Zhukhlistov A. P., Zaitseva L. V., Novakova A. A., Kustov Yu. E., Kochnev V. E. 2017, Biogenic hematite of rich iron ores of the Belenikhinsky deposit of the Belgorod KMA. *Vestnik VGU. Geologiya* [Proceedings of Voronezh State University. Geology], no. 4, pp. 58–62. (*In Russ.*)
15. Bourliva A., Papadopoulou L., Aidona E., Giouri K., Simeonidis K., Vourlias G. 2017, Characterization and geochemistry of technogenic magnetic particles (TMPs) in contaminated industrial soils: Assessing health risk via ingestion. Geoderma. Vol. 295, pp. 86–97. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.02.001
16. Glukhov M. S., Sungatullin R. Kh., Galiullin B. M., Sungatullina G. M., Bakhtin A. I., Gusev A. V., Kuzina D. M. 2018, Metallic microspheres of cosmic and technogenic originMicrospheres of Cosmic and Technogenic Origin. *Meteoritics & Planetary Science*, vol. 53, issue S1, p. 6202.
17. Sungatullin R. Kh., G. Sungatullina G. M., Glukhov, M. S., Osin Yu. N., Vorob'ev V. V. 2015, Opportunities for the use of space microspheres while tracking oil and gas sediments. *Neftyanoye khozyaystvo* [Oil industry], no. 2, pp. 16–19. (*In Russ.)*
18. Sungatullin R. Kh., Bakhtin A. I., Tsel'movich V. A., Sungatullina G. M., Glukhov, M. S., Osin Yu. N., Vorob'ev V. V. 2015 , Iron-nickel microparticles in sedimentary rocks as indicators of cosmic processes. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki* [Proceedings of Kazan University. Natural Sciences Series], vol. 157. Book 3, pp. 102–118. (*In Russ.)*

* ✉ gluhov.mixail2015@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0002-5075-7066

19. Fredriksson K., Gowdy R. 1963, Meteoritic debris from the Southern California desert. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 27(3), pp. 241–243.
20. Sokol E. V., Maksimova N. V., Nigmatulina E. N., Frenkel A. E. 2001, *Priroda, khimicheskiy i fazovyy sostav energeticheskikh zol chelyabinskikh ugley* [Nature, chemical and phase composition of ash of Chelyabinsk coal]. Novosibirsk, 107 p.
21. Bernstein M. L. 1979, *Atlas defektov stali* [Atlas of steel defects]. Moscow, 188 p.
22. Osovetsky B. M., Menshikova E. A. 2006, *Prirodno-tekhnogennyye osadki* [Natural and man-made sediments]. Perm, 209 p.
23. Balabanov Yu. P., Sungatullin R. Kh., Sungatullina G. M., Kosareva L. R., Glukhov M. S., Yakunina P. G., Zhernenkov A. O., Antonenko V. V., Churbanov A. A. 2019, Magnetostratigraphy of the Reference Sections of the Cisuralian Series (Permian System). Recent Advances in Rock Magnetism, Environmental Magnetism and Paleomagnetism: International Conference on Geomagnetism, Paleomagnetism and Rock Magnetism (Kazan, Russia). Cham, Switzerland: Springer Geophysics, pp. 317–342.

*The article was received on November 20, 2018*

УДК 548.4 https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-1-67-79

# Механизмы и причины изменения формы кристаллов в процессе роста

**Григорий Иванович СТРАШНЕНКО***

Геолого-промышленное предприятие "Центрально-Уральское", Россия, Екатеринбург

***Актуальность публикации*** состоит в дальнейшем развитии нового направления в минералогической кристаллографии – динамической кристалломорфологии, позволяющей по изменяющейся в процессе роста форме кристаллов получить информацию о физико-химических условиях образования месторождений полезных ископаемых.
***Цель работы***: теоретическое обоснование и разработка метода морфокинетического анализа и методики построения морфогенетических диаграмм природных кристаллов.
***Методология исследования***: изучение механизмов и причин изменения формы кристаллов на основе наблюдаемых минералогических фактов и идеализированных геометрических моделей, а также морфометрический анализ комбинационных форм кристаллов.
***Результаты***. Рассмотрены четыре кинематических механизма сохранения и изменения формы кристаллов. Доказывается, что форма кристалла конкретного минерала прямо определяется пересыщением раствора (переохлаждением расплава, давлением пересыщенных паров). Все иные факторы, такие как температура, давление, водородный показатель *pH*, окислительно-восстановительный потенциал *Eh*, активность других ионов, участвующих в минералообразующем процессе, влияют на форму кристаллов опосредованно, изменяя пересыщение раствора. Показано, что в зависимости от направленности и скорости изменения пересыщения в каждом классе симметрии можно выделить 7 морфогенетических рядов закрытых или квазизакрытых простых кристаллографических форм (ПКФ). Каждый ряд представляет последовательность ПКФ, в которой каждая последующая ПКФ замещает предыдущую. Выделены морфогенетические ряды: 1) регрессивный эволюционный; 2) прогрессивный эволюционный; 3) регрессивный прерывистый»; 4) прогрессивный прерывистый; 5) регрессивный шоковый; 6) прогрессивный шоковый; 7) переменный. Предложена методика построения морфогенетических диаграмм на примере построения диаграммы для регрессивного эволюционного ряда ПКФ класса симметрии *m3m* кубической сингонии. Приведена морфогенетическая диаграмма переменного ряда, построенная на примере конкретного кристалла касситерита.

*Ключевые слова*: минерал, кристалл, форма, *F*-функция, пересыщение, морфогенетический ряд, морфогенетическая диаграмма.

## Введение

Форма кристаллов является одним из важных типоморфных признаков, широко используемых в практической минерагении [1, 2]. Обычно она описывается набором символов простых кристаллографических форм (символов Миллера), участвующих в огранении кристалла. Недостатком такого рода описания является невозможность использования символов Миллера для математического представления непрерывного изменения формы кристаллов в процессе их роста. С целью устранения этого недостатка автором для описания формы кристаллов была предложена количественная мера, названная морфометрической функцией (F-функцией) [3]. С помощью этой функции любая форма кристаллов выражается числом, а её изменение – математическим уравнением. В статье проведен кинематический и кинетический анализ механизмов и причин изменения формы кристаллов с использованием F-функции, что позволяет наметить основные положения общей теории морфогенеза, базирующейся на полевых наблюдениях (феноменах) и результатах экспериментов по росту кристаллов в средах, близких природным. На примере ПКФ класса симметрии *m3m* и кристалла касситерита показана применимость теории морфогенеза для построения морфогенетических диаграмм, являющихся формализованным инструментом решения минерагенических задач.

## Механизмы изменения формы кристаллов в процессе роста

Изменение формы кристалла происходит путем смены одних простых кристаллографических форм (ПКФ), участвующих в его огранении, другими ПКФ. В процессе роста в огранении кристалла остаются лишь те ПКФ, которые характеризуются наименьшей скоростью роста относительно других ПКФ [1]. Грани с большей скоростью роста постепенно вырождаются в ребро или вершину кристалла. В настоящее время форма кристалла описывается с помощью таких принятых в кристаллографии понятий, как огранение, габитус, облик. Дадим кристаллографически строгое определение этих категорий.

**Огранение кристалла** – совокупность всех ПКФ, наблюдаемых на выпуклом многограннике. Описание огранения представляет перечень ПКФ, либо ряд их символов, обычно расположенных в порядке убывания их морфологической значимости.

**Габитус кристалла** определяется преимущественным развитием на полиэдре одной или двух, реже трех простых форм. Записывается габитус также в виде ряда символов габитусных ПКФ.

**Облик кристаллов** чаще всего определяется преимущественным развитием части граней одной простой формы. Например, для кристаллов кубического габитуса облик может быть:

– столбчатый при преимущественном развитии четырех граней одного пояса;
– пластинчатый при преимущественном развитии двух противоположных граней;
– изометричный при равномерном развитии всех граней.

Огранение и габитус, с одной стороны, и облик с другой, имеют разную природу [2]. Огранение и габитус кристалла однозначно определяются физическими и химическими условиями среды минералообразования. Из всех теоретически

* ✉ *strashnenko_gi@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-2008-8359

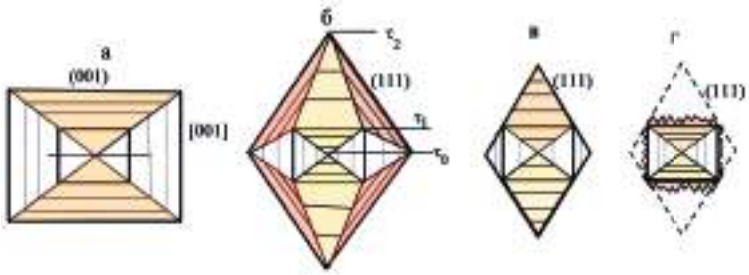



**Рисунок 1. Механизмы изменения формы кристаллов в процессе роста.**
**Figure 1. Mechanisms of changing in the shape of crystals during their growth.**

возможных в данной пространственной группе ПКФ при фиксированных физико-химических условиях среды на полиэдре реализуется лишь часть из них. Изменение огранения и габитуса кристалла в процессе роста является реакцией его пространственной группы на изменение условий среды. Облик кристаллов определяется отклонением симметрии питающего потока от сферической под влиянием силы тяжести, либо геометрии кристаллизатора. Предметом следующего рассмотрения является изменение габитуса кристаллов.

Определим употребляемые ниже понятия.

**Нормальная скорость роста грани** – скорость перемещения грани по нормали, проведенной к грани с точки ее зарождения.

**Тангенциальная скорость роста грани** – скорость увеличения площади грани.

***F*-функция** – функция линейных и угловых элементов кристалла, являющаяся количественной мерой его формы. Геометрически *F*-функция представляет площадь полной поверхности идеального кристалла, объем которого в принятой системе мер равен 1. *F*-функция изменяется в пределах $4{,}836 < F < \infty$ и определяется по формуле [3, 4]:

$$F = \left(V\right)^{-2/3} M, \tag{1}$$

где $V$ – объем кристалла; $M$ – площадь полной поверхности кристалла.

**Вершины и ребра кристалла** далее рассматриваются как грани размерности соответственно 0 и 1. Скорость роста их будем обозначать символом с соответствующим верхним индексом ($v^0$ или $v^1$).

Далее перейдем к характеристике механизмов изменения габитуса кристаллов. Рассмотрим их на примере смены кубического габитуса на октаэдрический. На рис. 1 приведены разрезы кристалла по плоскости (110) для четырех вариантов его роста. Во всех вариантах кристалл зарождается в форме куба и сохраняет ее до момента времени $\tau_1$.

Вариант 1 (рис. 1, а). Кристалл растет, сохраняя свою форму. Отношение скоростей граней куба и октаэдра определяется неравенством $v_{(100)} < v^0_{(111)}$. Механизм, при котором форма кристалла не изменяется, назовем стабильным.

Вариант 2 (рис. 1, б). С момента времени $\tau_1$ в огранении кристалла появляются грани октаэдра и до момента времени $\tau_2$ форма кристалла сохраняется в виде комбинации куба и октаэдра с постепенным возрастанием доли последнего. Тело кристалла в этом случае образовано пирамидами нарастания граней куба и октаэдра. Отношение скоростей граней определяется неравенством $v_{(100)} > v_{(111)}$. В момент времени $\tau_2$ кристалл приобретает чисто октаэдрический габитус. Механизм изменения формы кристалла, при котором грани обеих ПКФ находятся в фазе активного роста, определим как квазистабильный.

Вариант 3 (рис. 1, в). Октаэдр в огранении кристалла появляется как форма полного торможения: $v_{(100)}/v_{(111)} = \infty$. Тело кристалла в этом случае образовано, как и в варианте 1, только пирамидами нарастания граней куба. В сравнении с вариантом 2 перерождение куба в октаэдр происходит значительно быстрее. Механизм изменения формы кристалла, при котором замещающая ПКФ находится в фазе полного торможения, определим как метастабильный.

Вариант 4 (рис. 1, г). Грани куба покрываются слоем многоглавого роста, образованным гранями октаэдра. Образующиеся при этом ложные индивиды унаследуют структуру подложки и представляют с ней монокристалл. Постепенно разрастаясь, этот слой с течением времени преобразуется в октаэдр. Подобного рода механизм изменения формы кристалла определим как регенерационный, или шоковый.

Вместе с тем для двух ПКФ, участвующих в огранении кристалла, существует интервал значений отношения их скоростей роста, в пределах которого обе ПКФ являются комбинационно квазиустойчивыми и могут при постоянстве условий минералообразования сохраняться достаточно долго. Для расчета границ этого интервала Л. Боргстрём применил геометрическую методику, с которой можно ознакомиться в книге Г. Бакли [5]. Сохраняя идею Л. Боргстрёма, выведем формулы для определения граничных отношений скоростей роста граней двух ПКФ более простым способом. На рис. 2 показано перпендикулярное к ребру *K* сечение двугранного угла, образованного гранями формы 1 и формы 2. Из точки *K* проведем нормали к граням 1 и 2. Очевидно, что угол α, образованный этими нормалями, равен дополнительному углу к двугранному. Рассмотрим два предельных варианта, в которых ребро *K* в процессе роста перемещается в положение *K'* на нормали к грани 2, а во втором случае в положение *K"* на нормали к грани 1. Поскольку скорость роста граней кристалла пропорциональна длине их нормалей, в положении *K'* искомое отношение скоростей роста двух граней определится из Δ*KK'a*:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{n_1^{K'}}{n_2^{K'}} = \cos\alpha. \tag{2}$$

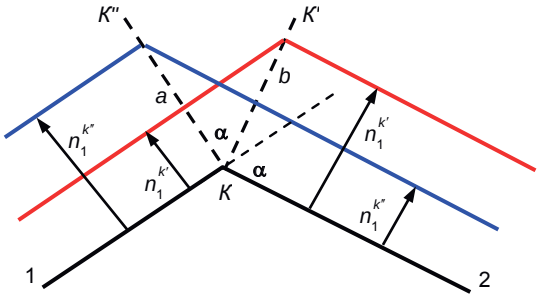



**Рисунок 2. Кинематика роста смежных граней двух ПКФ.**
**Figure 2. Growth kinematics of adjacent faces of two SCFs.**

При $v_1/v_2 < \cos\alpha$ рост кристалла переходит в режим торможения граней ПКФ 1. В положении *K''* отношение скоростей роста двух граней определяется из Δ*KK'b*,

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{n_1^{k''}}{n_2^{k''}} = \frac{1}{\cos\alpha}. \quad (3)$$

При $v_1/v_2 > \cos\alpha$ рост кристалла переходит в режим торможения граней ПКФ 2. Обе ПКФ будут комбинационно устойчивыми в интервале определенных ранее граничных отношений скоростей роста их граней, определяемых формулами (2)и (3):

$$\cos\alpha \le \frac{v_1}{v_2} \le \frac{1}{\cos\alpha}. \quad (4)$$

Изменение формы кристалла во времени документируется по анатомическим картинам их секториального строения [1, 2]. Покажем на примере конкретных минералов, как изменяют свою форму кристаллы в процессе роста, как работают механизмы этого изменения. На рис. 3 приведена схематическая анатомическая картина кристалла касситерита в плоскости (110). Картина составлена автором по прекрасным зарисовкам кристаллов касситерита, выполненным З. Н. Евзиковой [6]. На картине ось времени совмещена с осью *Z* кристалла. Полная продолжительность роста кристалла принята за 1 и разделена на 6 стадий. Время τ завершения каждой стадии определено по вырождению какой-либо ПКФ, либо по появлению новой ПКФ в огранении кристалла.

Стадия I (τ = 0,0–0,08). Кристалл зарождается и растет до τ = 0,08 в форме тетрагональной бипирамиды {111}. Отношение скорости ее граней к скорости виртуальных граней размерности 1 бипирамиды {771} определено по формуле (2): $v_{(111)} / v^1_{(771)} < 0,79$. Реализуется стабильный механизм изменения формы кристалла (рис. 1, а).

Стадия II (τ = 0,08–0,40). В огранении появляется новая форма – бипирамида {771}. До τ = 0,40 кристалл растет за счет пирамид нарастания граней бипирамиды {111}. Острая бипирамида {771}, разрастаясь тангенциально, проявляет себя как форма полного торможения: по формуле (3) $v_{(111)}/v_{(771)} > 1,27$. Форма кристалла на этой стадии представляет комбинацию бипирамид {111} и {771} при постепенном с течением времени доминировании последней. В момент τ = 0,40 {111} полностью вырождается и в огранении кристалла остается только бипирамида {771}. Реализуется метастабильный механизм изменения формы кристалла (рис. 1, в).

Стадия III (τ = 0,40–0.48). Бипирамида {771} переходит в режим активного роста. В момент τ = 0,40 появляются две новые ПКФ: пинакоид и призма {110}, которая является формой полного торможения. Форма кристалла представляет

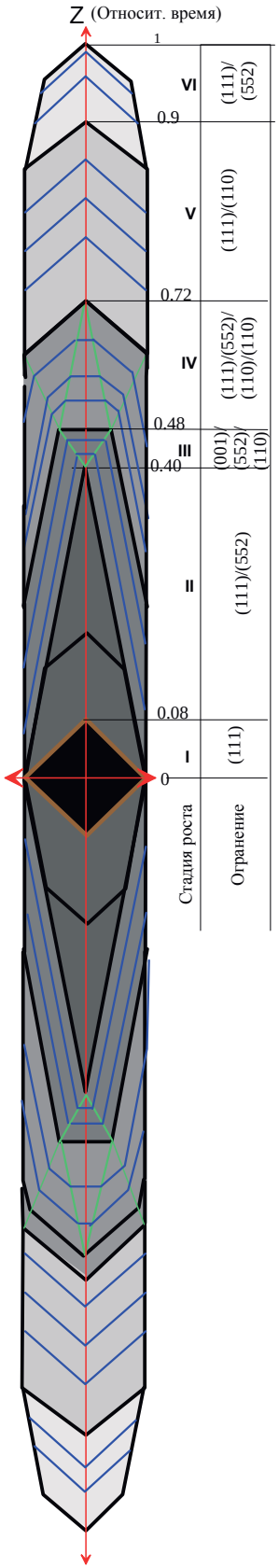



**Рисунок 3. Разрез кристалла касситерита по (110).**
**Figure 3. Cassiterite crystal section (110).**

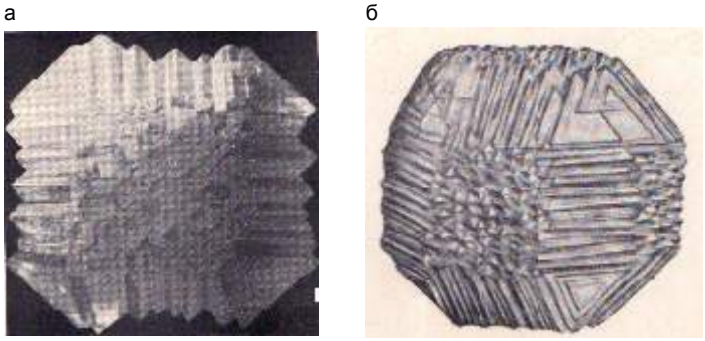



**Рисунок 4. Изменение формы кристаллов по регенерационному механизму.** а – алюмокалиевые квасцы (из книги Г. Бакли [5]); б – алмаз (из атласа А. Е. Ферсмана [7], Бразилия).

**Figure 4. Changes in the shape of crystals according to the regeneration mechanism. a – aluminum potassium sulphate (from the book by Buckley [5]); б – diamond (from the atlas by A. E. Fersman [7], Brazil).**

комбинацию бипирамиды {771}, пинакоида {001} и призмы {110}. На данной стадии реализуются квазистабильный и метастабильный механизмы изменения формы (рис. 1, б, в).

Стадия IV (τ = 0,48–0,72). В момент времени τ =0,48 в огранении кристалла вновь появляется бипирамида {111}. До τ =0,72 все ПКФ, за исключением призмы, находятся в фазе активного роста. Призма на всех стадиях роста кристалла остается формой торможения. В момент времени τ = 0.72 острая бипирамида и пинакоид вырождаются. В течение данной стадии огранение кристалла изменяется от {110}/{771}/{001}/{111} до {110}/{111}. По формуле (4) отношения скоростей их граней выражаются неравенствами: $0{,}79 \le v_{(111)}/v_{(771)} \le 1{,}27$; $0{,}725 \le v_{(111)}/v_{(001)} \le 1{,}38$. Если исключить призму, то на данной стадии реализуется только квазистабильный механизм изменения формы кристалла (рис. 1, б).

Стадия V (τ = 0,72–0,90). В течение данной стадии в огранении кристалла остаются бипирамида {111} и призма {110}. Тело кристалла увеличивается только за счет пирамид нарастания граней бипирамиды. Призма {110} остается формой торможения, реализуется метастабильный механизм изменения формы кристалла (рис. 1, в).

Стадия VI (τ = 0,90–1,00). Венчает кристалл комбинация двух бипирамид – {111} и {771}. При этом бипирамида {771}, как и на стадии II, является формой торможения. Конечная форма кристалла представляет комбинацию ПКФ {110}/{771}/{111}. Реализуется метастабильный механизм изменения формы кристалла (рис. 1, в).

На протяжении своего роста кристалл касситерита 6 раз изменял форму. При этом имеют место три первых из четырех описанных выше механизмов изменения формы кристаллов. Можно заметить, что это изменение носит циклический характер. Стадии V и VI повторяют стадии I и II, что может свидетельствовать о пульсационном характере поступления в кристаллизатор рудообразующих растворов.

Изменение формы кристаллов по регенерационному механизму (рис. 1, г) моделируется в лабораторных условиях при шоковом изменении условий кристаллизации, а также наблюдается на природных кристаллах. Г. Бакли в своей книге приводит следующий эксперимент, проделанный Спенсом с кристаллом алюмокалиевых квасцов. Кубический кристалл, выращенный в щелочном растворе, он поместил в нейтральный раствор этих же квасцов. В результате этого грани и ребра исходного куба покрылись мелкими гранями октаэдра. Кристалл при этом сохранил общий кубический облик (рис. 4, а). Естественно предположить, что при дальнейшей кристаллизации произошло бы полное изменение габитуса кристалла с кубического на октаэдрический. Мой коллега по Киевскому университету И. Г. Максимчук неоднократно повторял этот опыт с алюмокалиевыми квасцами и показывал мне его результаты, ничем не отличающиеся от результатов в эксперименте Спенса. Подобные изменения формы встречаются и на природных кристаллах. На рис. 4 показаны фото кристаллов квасцов и алмаза. Их сравнение показывает, что форма кристалла алмаза практически является репликой формы кристалла алюмокалиевых квасцов.

Рассмотрев механизмы изменения формы кристаллов, мы дали ответ на вопрос, как в процессе роста изменяется габитус кристаллов. Кристаллы изменяют свою форму путем изменения относительных скоростей роста граней ПКФ. Чтобы дать ответ на вопрос, почему в процессе роста изменяется габитус кристаллов, необходимо рассмотреть факторы (силы), определяющие скорость роста граней разных ПКФ.

## Кинетический анализ морфогенеза кристаллов

Скорость роста граней *i*-й ПКФ зависит от пересыщения раствора (переохлаждения расплава, давления пересыщенных паров). По результатам экспериментов по искусственному выращиванию кристаллов [8–14] зависимость эту можно выразить показательной функцией вида:

$$v_i = k_i\left(\Delta C\right)^{ni}, \tag{5}$$

где $\Delta C$ – пересыщение; $k_i$, $n_i$ – характеристические постоянные *i*-й ПКФ, $n_i \ge 1$.

Как было показано ранее, форма кристаллов Ф определяется отношением скоростей роста граней ПКФ. Тогда, с учетом (5), зависимость формы кристалла (*F*-функции) от пересыщения для комбинации *i*-й и *j*-й ПКФ в общем виде определится выражением

$$\Phi_{i/j} = F_{i/j} = f\left(\frac{v_i}{v_j}\right) = f\left[\frac{k_i}{k_j}\left(\Delta C\right)^{ni-nj}\right]. \tag{6}$$

Пересыщение, в свою очередь, является функцией термодинамических параметров минералообразующей системы: температуры $t$, давления $p$, химических потенциалов подвижных компонентов μ, в качестве которых могут выступать водородный показатель $pH$, окислительно-восстановительный потенциал $Eh$, активность других ионов, участвующих в минералообразующем процессе [15–17];

$$\Delta C = \varphi\left(t, p, \mu\right). \tag{7}$$

Подставив (7) в (6), выразим в общем виде функциональную зависимость формы кристалла от термодинамических параметров среды кристаллизации для двойной комбинации ПКФ:

$$F_{i/j} = f\left[\frac{k_i}{k_j}\left(j\left(t, p, \mu\right)\right)^{ni-nj}\right]. \tag{8}$$

Формулы (6–8) показывают, что форма кристалла какого-либо конкретного минерала однозначно определяется пересыщением раствора. Все иные факторы влияют на его форму опосредованно, изменяя пересыщение раствора [3, 18].

Для выражения функции (6) в явном виде необходимы экспериментальные данные по растворимости минерала и скоростям роста граней разных ПКФ его кристаллов в средах, близких к природным. Такие данные имеются только для ограниченного числа минералов, в частности для пьезооптических и минералов: кварца, кальцита, флюорита [8, 13, 19], а также для корунда [12] и легкорастворимых кристаллических веществ [17, 20]. В работе [18] проведен морфокинетический анализ кварца на основе экспериментальных данных В. С. Балицкого [8] по растворимости и синтезу кристаллов кварца в гидротермальных средах. По результатам анализа получено выражение (6) в явном виде и построена морфогенетическая диаграмма кварца в координатах $\Delta C$–$F$.

Для тех минералов, для которых экспериментальные данные отсутствуют, можно построить морфогенетические диаграммы, основываясь на феноменологической теории морфогенеза кристаллов [3]. Кратко рассмотрим основные положения этой теории.

## Основные положения феноменологической теории морфогенеза кристаллов

1. Кристалл какого-либо минерального вида зарождается в виде единичной закрытой или квазизакрытой ПКФ. Под квазизакрытой ПКФ понимается полиэдр, образованный минимально возможным числом открытых ПКФ. По определению, это понятие относится только к кристаллам средних и низших категорий симметрии. Это положение основывается на минералогических наблюдениях, примером которых может служить рис. 3. Кристалл касситерита зародился в виде бипирамиды {111}.

2. Для каждой закрытой или квазизакрытой ПКФ существует свой интервал значений пересыщения, в пределах которого она является равновесной формой и может сохраняться себе подобной бесконечно долго.

3. Форма кристаллов в сравнении с внешней средой обладает большой инертностью. При переходе в интервал пересыщений, в котором стабильной является иная ПКФ, прежняя ПКФ может сохраняться достаточно долго в качестве метастабильной формы. Грани ее будут вырождаться, замещаясь гранями новой ПКФ, стабильной в этом интервале пересыщений. При этом могут появляться новые генерации кристаллов, в огранении которых будет участвовать только новая ПКФ.

4. Из (5) и (6) следует, что пересыщение можно представить как обратную функцию формы кристалла, его $F$-функции. Исходя из этого вводится понятие условного относительного пересыщения $\Delta C^0$, определяемого по формуле

$$\Delta C^0 = \frac{F}{F_0} - 1, \tag{9}$$

где $F$ – $F$-функция закрытой или квазизакрытой ПКФ; $F_0$ – универсальная кристаллографическая постоянная, $F_0 = 4{,}836...$ [6].

В условиях снижающегося пересыщения формула (6) определяет правую границу интервала персыщений, в котором стабильной является рассматриваемая ПКФ. При повышающемся пересыщении по формуле (9) определяется левая граница этого интервала. Для комбинационных форм $F$-функция сохраняет только геометрическое содержание как метрическая мера формы кристалла. Принимается, что в интервале стабильности отдельно взятой ПКФ пересыщение изменяется линейно.

5. По мере снижения пересыщения в огранении кристалла должны доминировать ПКФ с меньшим значением их $F$-функции, с большим количеством граней и с большими индексами Миллера. При повышении пересыщения должна наблюдаться обратная закономерность.

Рассмотрим некоторые из приведенных ранее теоретических положений более подробно. Допустимость положения 3 иллюстрирует рис. 5, на котором представлен сросток двух кристаллов гроссуляра из коллекции О. Н. Загорского. Ранняя генерация представлена крупным кристаллом, в огранении которого основной формой является тетрагонтриоктаэдр {112}, двенадцать вершин которого притуплены мелкими гранями ромбододекаэдра. Наросший на нем мелкий кристалл более поздней генерации представлен ромбододекаэдром. Размер граней ромбододекаэдра на обоих кристаллах одинаков, что указывает на одновременность появления граней ромбододекаэдра на основном кристалле и зарождения кристалла второй генерации. Очевидно, что в изменившихся условиях среды тетрагонтриоктаэдр является метастабильной формой, грани его сокращаются, замещаясь гранями ромбододекаэдра. При этом мелкий кристалл служит индикатором направленности этого процесса.

Покажем справедливость положения 5 на примере класса симметрии $m3m$ кубической сингонии. В этом классе комбинационно совместимы три постоянные формы (куб, октаэдр и ромбододекаэдр) и четыре переменные формы

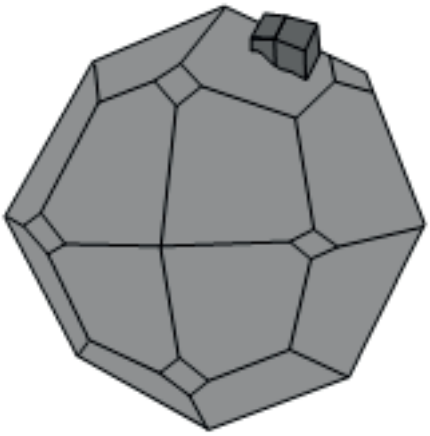


**Рисунок 5. Сросток кристаллов гроссуляра.**
**Figure 5. The intergrowth of crystals of a calcium aluminium garnet.**

**Таблица 1. Ряд ПКФ класса симметрии *m*3*m* кубической сингонии, расположенных по убыванию их *F*-функции.**
**Table 1. The SCF class series of the symmetry m3m of the cubic system descending from their F-function.**

| ПКФ | Куб | Октаэдр | Ромбо-додекаэдр | Тригонтри-октаэдр | Тетрагексаэдр | Тетрагонтриоктаэдр | Гексоктаэдр | Шар |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Символ | {100} | {111} | {110} | $\{hhl\}_{h>l}$ | {*hk*0} | $\{hhl\}_{h<l}$ | {*hkl*} | |
| *F* | 6,00 | 5,72 | 5,35 | 5,26–5,22 | 5,22–5,11 | 5,18–5,07 | 4,96–4,9 | 4,836 |
| $\Delta C^0$ | 0,24 | 0,18 | 0,11 | 0,089–0,08 | 0,08–0,06 | 0,07–0,05 | 0,03–0,01 | 0 |
| Число граней | 6 | 8 | 12 | 24 | 24 | 24 | 48 | ∞ |

Примечание: более детально с расчетом *F*-функции постоянных и переменных форм, а также их комбинаций можно ознакомиться в [3].

(тетрагексаэдр, тетрагонтриоктаэдр, тригонтриоктаэдр и гексоктаэдр). В табл. 1 все перечисленные ПКФ расположены в порядке убывания значений их *F*-функции. Дополнительно к ним в табл. 1 помещен шар как форма, к которой теоретически стремится форма кристаллов при бесконечно малом пересыщении. Для переменных ПКФ в табл. 1 приведены интервалы изменения *F*-функции и соответствующего ей условного пересыщения, в которые включены формы, наиболее часто встречающиеся в огранении природных кристаллов. Табл. 1 показывает, что с увеличением числа симметрично эквивалентных граней ПКФ *F*-функция асимптотически приближается к константе 4,836, а условное пересыщение асимптотически стремится к нулю.

В зависимости от направленности и скорости изменения пересыщения теоретически можно выделить 7 морфогенетических рядов, представляющих последовательность ПКФ, в которой каждая последующая ПКФ замещает предыдущую: 1) регрессивный эволюционный; 2) прогрессивный эволюционный; 3) регрессивный прерывистый» 4) прогрессивный прерывистый; 5) регрессивный шоковый; 6) прогрессивный шоковый, 7) переменный. Для регрессивных рядов первая производная от пересыщения по времени отрицательная, изменение формы кристаллов происходит под воздействием направленного снижения пересыщения раствора. Для прогрессивных рядов все наоборот: производная от пересыщения по времени положительная, изменение формы кристаллов происходит под воздействием направленного увеличения пересыщения раствора. Для переменных рядов первая производная от пересыщения по времени является знакопеременной функцией времени. Рассмотрим эти ряды более детально.

Регрессивный эволюционный ряд (*REL – regressive evolutional line*) представляет последовательность ПКФ, совместимых в каком-либо классе симметрии и выстроенных в порядке убывания их *F*-функции, а следовательно, и снижения пересыщения раствора. Для гексоктаэдрического класса симметрии (*m*3*m*) кубической сингонии этот ряд имеет следующий вид

$$REL:\{100\}(6,00)\leftarrow\{111\}\{5,72\}\leftarrow\{110\}(5,35)\leftarrow\left|\begin{matrix}\{hhl\}_{h>l}(5,26-5,22)\\ \{hk0\}(5,22-511)\\ \{hhl\}_{h<l}(5,18-5,07)\end{matrix}\right|\leftarrow\{hkl\}(4,96-4,90)\leftarrow\{\infty\}(4,84). \quad (10)$$

В ряду (10) в круглых скобках приведены значения *F*-функции ПКФ из табл. 2. В прямые скобки взяты ПКФ с равным количеством граней. Для переменных форм приведен интервал значений *F*-функции ПКФ, относительно часто встречаемых на реальных кристаллах. Символ {∞} представляет шар, к которому стремится форма кристаллов кубической сингонии при бесконечно малом пересыщении раствора [3].

Прогрессивный эволюционный ряд (*PEL – progressive evolutional line*) представляет последовательность ПКФ, выстроенных в порядке возрастания их *F*-функции, а следовательно, и увеличения пересыщения минералообразующего раствора. Он записывается так же, как и *REL*-ряд, только в обратном порядке. Для класса *m*3*m* *PEL*-ряд имеет вид:

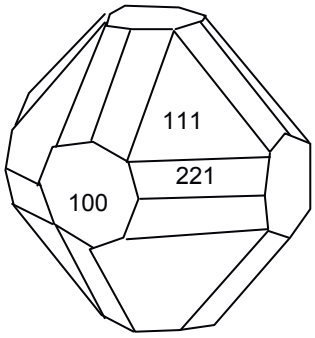



**Рисунок 6. Кристалл галенита [21].**
**Figure 6. Galena crystal [21].**

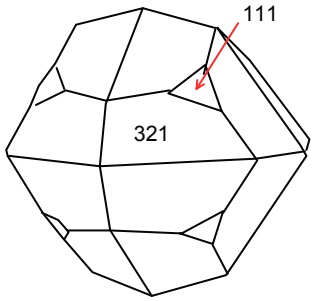



**Рисунок 7. Кристалл пирита [21].**
**Figure 7. Pyrite crystal [21].**

**Рисунок 8. Кристалл флюорита [22].**
**Figure 8. Fluorite crystal [22].**

$$PEL:\{\infty\}(4,84)\leftarrow\{hkl\}(4,9-4,96)\leftarrow\left|\begin{matrix}\{hhl\}_{h<l}(5,07-5,18)\\ \{hk0\}(5,11-5,22)\\ \{hhl\}_{h<l}(5,22-5,26)\end{matrix}\right|\leftarrow\{110\}(5,35)\leftarrow\{111\}(5,72)\leftarrow\{100\}(6,00). \quad (11)$$

Регрессивный прерывный ряд (*RBL – regressive break line*) обычно представляет собой фрагмент регрессивного эволюционного ряда (10), во внутренней части которого отсутствуют отдельные его члены. Выпадение из прерывного ряда какой-либо ПКФ или нескольких ПКФ может быть вызвано пульсационным характером минералообразующей системы, когда ее деятельность по геологическим причинам на какое-то время прекращается, а затем возобновляется, но уже при условиях, при которых выпавшие из ряда ПКФ являются нестабильными. В качестве примера построим морфогенетический ряд изменения формы кристалла галенита (класс симметрии $m3m$), изображенного на рис. 6. Можно видеть, что в огранении кристалла грани тригонтриоктаэдра {221} замещают грани куба и октаэдра, грани ромбододекаэдра отсутствуют. В данном случае мы имеем регрессивный прерывный ряд:

$$PBL:\{100\}(6,00)\leftarrow\{111\}(5,72)\leftarrow *\leftarrow\{221\}(5,76). \quad (12)$$

Звездочка в записи прерывных рядов означает отсутствие какой-либо ПКФ.

Прогрессивный прерывный ряд (*PBL – progressive break line*) представляет собой фрагмент прогрессивного эволюционного ряда (11), во внутренней части которого отсутствуют отдельные его члены. Данный ряд обусловлен прерывистым увеличением пересыщения. Для примера построим морфогенетический ряд кристалла пирита (класс $m3$), в огранении которого грани дидодекаэдра {321} начинают замещаться гранями октаэдра (рис. 7), при этом отсутствуют грани пентагондодекаэдра:

$$PBL:\{321\}(4,92)\leftarrow *\leftarrow\{111\}(5,72). \quad (13)$$

Регрессивный шоковый ряд (*RSL – regressive shocking line*) состоит из двух ПКФ, построенных в порядке убывания их *F*-функции. Изменение формы кристалла в этом ряду происходит по механизму, изображенному на рис. 1, г, в результате резкого (шокового) снижения пересыщения. Примером *RSL*-ряда служат кристаллы Al, *K*-квасцов и алмаза (рис. 4), морфогенетический ряд для которых имеет вид:

$$RSL:\{100\}(6,00)\Leftarrow\{111\}(5,72). \quad (14)$$

Широкой стрелкой условимся обозначать в морфогенетических рядах реакцию формы кристалла на шоковое изменение условий кристаллизации, в отличие от узкой стрелки в эволюционных рядах.

Прогрессивный шоковый ряд (*PSL – progressive shocking line*) имеет последовательность ПКФ, обратную *RSL*-ряду и описывает изменение формы кристаллов при шоковом повышении пересыщения. Примером *PSL*-ряда может служить кристалл флюорита, изображенный на рис. 8. Кристалл первоначально октаэдрического габитуса покрыт полностью как бы отдельными мелкими кубиками, в сумме сохраняющими первоначальный октаэдрический облик кристалла. Морфогенетический ряд для него имеет вид:

$$RSL:\{111\}(5,72)\Leftarrow\{100\}(6,00).$$

Переменный ряд (*CL – change line*) представляет ряд ПКФ, выстроенных в порядке их появления в огранении кристалла. Изменение *F*-функции в отдельных звеньях этого ряда может быть разнонаправленным. По сути, *CL*-ряд состоит из фрагментов регрессивных и прогрессивных рядов. Морфогенетические ряды, подобные приведенным ранее, могут быть составлены для любого класса любой категории симметрии. Изменение формы кристаллов, которое соответствовало бы полным эволюционным рядам (7) и (8), явление маловероятное. Обычно оно описывается фрагмен-

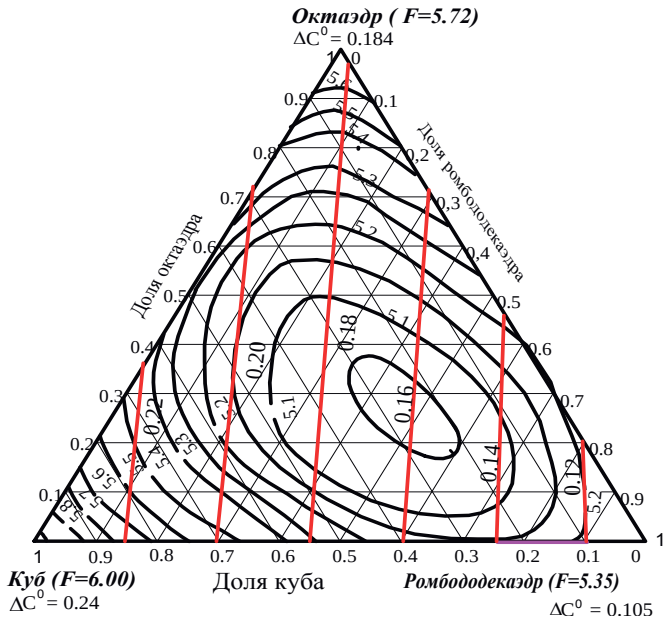



**Рисунок 9. Морфогенетическая триаграмма системы (100)/(111)/(110).**
**Figure 9. Morphogenetic triagram of the system (100) / (111) / (110).**

**Таблица 2. Уравнения *F*-функции двойных комбинационных форм кристаллов класса симметрии *m*3*m* кубической сингонии (*REL*-ряд).**
**Table 2. Equations of the F-function of double combination forms of crystals of the symmetry class m3m of cubic system (REL-series).**

| Комбинация | $F = f(\eta)$ | $\eta = \varphi(\Delta C^0)$ | $F = f(\Delta C^0)$ | Интервал пересыщений |
|---|---|---|---|---|
| {100}/{111} | $F = 2{,}32\eta^2 - 2{,}6\eta + 6$ | $\eta = -18{,}1\Delta C^0 + 4$ | $F = 781{,}4(\Delta C^0)^2 - 317{,}88(\Delta C^0) + 38{,}45$ | $0{,}24 > \Delta C^0 > 0{,}184$ |
| {111}/{110} | $F = 1{,}22\eta^2 - 0{,}85\eta + 5{,}35$ | $\eta = 12{,}7\Delta C^0 - 1{,}34$ | $F = 194{,}9(\Delta C^0)^2 - 51{,}76(\Delta C^0) + 8{,}64$ | $0{,}184 > \Delta C^0 > 0{,}105$ |
| {110}/{221} | $F = 0{,}58\eta^2 - 0{,}67\eta + 5{,}35$ | $\eta = -18{,}62\Delta C^0 + 1{,}96$ | $F = 201{,}1(\Delta C^0)^2 - 29{,}9(\Delta C^0) + 6{,}27$ | $0{,}105 > \Delta C^0 > 0{,}052$ |
| {110}/{210} | $F = 0{,}57\eta^2 - 0{,}8\eta + 5{,}35$ | $\eta = -18{,}62\Delta C^0 + 1{,}96$ | $F = 197{,}6(\Delta C^0)^2 - 26{,}75(\Delta C^0) + 5{,}97$ | $0{,}105 > \Delta C^0 > 0{,}052$ |
| {110}/{112} | $F = 0.82\eta^2 - 1{,}08\eta + 5{,}35$ | $\eta = -18{,}62\Delta C^0 + 1{,}96$ | $F = 284{,}3(\Delta C^0)^2 - 39{,}8(\Delta C^0) + 6{,}39$ | $0{,}105 > \Delta C^0 > 0{,}052$ |
| {221}/{321} | $F = 0{,}72\eta^2 - 1{,}06\eta + 5{,}26$ | $\eta = -28{,}82\Delta C^0 + 1{,}49$ | $F = 597{,}9(\Delta C^0)^2 - 31{,}28(\Delta C^0) + 5{,}28$ | $0{,}052 > \Delta C^0 > 0{,}017$ |
| {210}/{321} | $F = 0{,}51\eta^2 - 0{,}71\eta + 5{,}12$ | $\eta = -28{,}82\Delta C + 1{,}49$ | $F = 423{,}5(\Delta C^0)^2 - 23{,}34(\Delta C^0) + 5{,}19$ | $0{,}052 > \Delta C^0 > 0{,}017$ |
| {112}/{321} | $F = 0{,}48\eta^2 - 0{,}65\eta + 5{,}09$ | $\eta = -28{,}82\Delta C^0 + 1{,}49$ | $F = 398{,}6(\Delta C^0)^2 - 22{,}49(\Delta C^0) + 5{,}19$ | $0{,}052 > \Delta C^0 > 0{,}017$ |
| {321}/{∞} | $F = 0{,}08\eta^2 + 4{,}836$ | $\eta = -58{,}8\Delta C^0$ | $F = 293{,}85(\Delta C^0)^2 + 4{,}836$ | $0{,}017 > \Delta C^0 > 0{,}0$ |

Примечание: с выводом уравнений *F*-функции двойных комбинаций ПКФ кубической сингонии можно ознакомиться в [3].

тами этих рядов, включающими разные комбинации габитусных форм. Изменения формы кристаллов, описываемые прерывными, шоковыми и в особенности переменными морфогенетическими рядами, довольно часто встречаются на месторождениях, образованных в активных тектонических областях.

## Построение морфогенетических диаграмм

Изменение формы кристаллов многими авторами графически отражается в виде последовательности чертежей различных габитусных форм, под которыми стрелкой показывается направленность изменения какого-либо параметра среды [2, 23]. Интересной является попытка В. Н. Трубина [24] выявить математическую зависимость между формой кристаллов алмаза и термодинамическими параметрами его образования. В качестве меры формы кристалла он принял среднее число граней, приходящихся на одну вершину. Эту меру нельзя признать корректной, поскольку она является дискретной, а с ее помощью автор пытается описать непрерывный процесс изменения формы кристалла.

Диаграммы, теоретической основой построения которых являются приведенные ранее положения феноменологической теории морфогенеза кристаллов, предлагается называть морфогенетическими. В зависимости от того, сколько ПКФ участвует в огранении кристаллов, диаграммы могут быть двойными, тройными и развернутыми с количеством ПКФ более 3. Для эволюционных и прерывных рядов диаграммы строятся в координатах $\Delta C^0$–*F*, для переменных – «Относительное время $\Delta C^0$, *F*». Методику расчета и построения морфогенетических диаграмм подробно покажем на примере построения морфогенетической диаграммы *REL*-ряда ПКФ класса *m*3*m* кубической сингонии.

Зададимся системой координат $\Delta C^0$–*F*. По координатам ПКФ из табл. 1 в выбранном масштабе выносим точки каждой ПКФ. Через эти точки проводим прямые, параллельные оси *F*. Эти прямые для каждой ПКФ ограничивают справа интервал условного пересыщения, в котором ПКФ является равновесной, может зарождаться и расти, оставаясь себе подобной бесконечно долго. От каждой точки проводим утолщенные прямые, параллельные оси $\Delta C^0$, до их пересечения с ближайшей слева вертикальной прямой. В результате получается ступенчато-прерывистый график, определяющий интервалы стабильного существования каждой ПКФ. Далее отразим на диаграмме морфогенез комбинационных форм.

**Таблица 3. Уравнения *F*-функции тройной комбинационной системы {100}/{111}/{110} класса симметрии *m*3*m*.**
**Table 3. The F-function equations of the ternary combination system {100} / {111} / {110} of m3m class of symmetry.**

| Уравнение | Интервал задания функции |
|---|---|
| $F_{0,1\{111\}} = 317(\Delta C^0)^2 - 87{,}6(\Delta C^0) + 11{,}13$ | $0{,}184 > \Delta C^0 > 0{,}113$ |
| $F_{0,2\{111\}} = 334(\Delta C^0)^2 - 96.9(\Delta C^0) + 12{,}7$ | $0{,}184 > \Delta C^0 > 0{,}121$ |
| $F_{0,3\{111\}} = 350(\Delta C^0)^2 - 105{,}1(\Delta C^0) + 12{,}93$ | $0{,}184 > \Delta C^0 > 0{,}129$ |
| $F_{0,4\{111\}} = 347(\Delta C^0)^2 - 109(\Delta C^0) + 13{,}63$ | $0{,}184 > \Delta C^0 > 0{,}137$ |
| $F_{0,5\{111\}} = 392(\Delta C^0)^2 - 128(\Delta C^0) + 15{,}58$ | $0{,}184 > \Delta C^0 > 0{,}145$ |
| $F_{0,6\{111\}} = 439(\Delta C^0)^2 - 148(\Delta C^0) + 17{,}71$ | $0{,}184 > \Delta C^0 > 0{,}153$ |
| $F_{0,7\{111\}} = 555(\Delta C^0)^2 - 193(\Delta C^0) + 21{,}97$ | $0{,}184 > \Delta C^0 > 0{,}16$ |
| $F_{0,8\{111\}} = 888(\Delta C^0)^2 - 310(\Delta C^0) + 32{,}33$ | $0{,}184 > \Delta C^0 > 0{,}168$ |

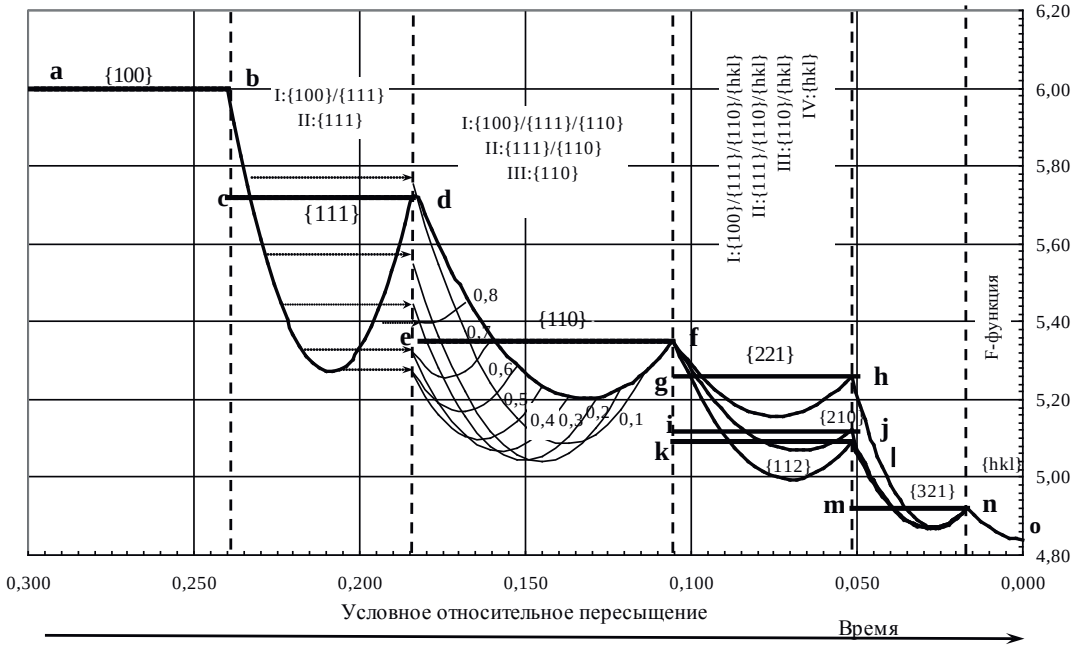



**Рисунок 10. Морфогенетическая диаграмма ПКФ гексоктаэдрического класса, *REL*-ряд.**
**Figure 10. Morphogenetic diagram of SCF of the hexactahedral class, REL-series.**

Сначала рассмотрим двойные комбинации (табл. 2). Кристалл, зародившийся и росший при $\Delta C^0 \geq 0{,}24$ в форме куба, при переходе через эту границу реагирует на снижение пересыщения появлением в его огранении граней октаэдра. При этом куб становится метастабильной, постепенно вырождающейся формой, а октаэдр равновесной формой в интервале пересыщений $0{,}24 > \Delta C^0 \geq 0{,}18$. В парагенезисе с комбинационными кристаллами в этом интервале могут появляться более поздние кристаллы чисто октаэдрического габитуса.

Допустим, что полное перерождение куба в октаэдр происходит на правой границе поля устойчивости октаэдра ($\Delta C^0 = 0{,}18$). Тогда трек изменения формы кристалла описывается уравнением *F*-функции комбинации куба и октаэдра. В качестве переменной в этом уравнении принята доля граней октаэдра в площади полной поверхности кристалла η: $0 \leq \eta \leq 1$. Во втором столбце табл. 2 помещены уравнения *F*-функции от геометрической переменной η для всех возможных в *REL*-ряду двойных комбинаций. В третьем столбце дана формула замены переменной η на новую переменную $\Delta C^0$, выведенная для комбинации куба и октаэдра из соотношения этих переменных на границах интервала стабильности октаэдра (η, $\Delta C^0$): 1) (0, 0,24); 2) (1, 0,184). В четвертом столбце приведены уравнения *F*-функции от переменной $\Delta C^0$. Графиками этой функции, заданной на интервале стабильности (столбец 5) замещающей ПКФ, пополняем строящуюся диаграмму. В этом виде *REL*-ряд представляет идеализированную модель изменения формы кристаллов, в которой каждая метастабильная форма вырождается полностью на правой границе интервала стабильности следующей за ней равновесной формы. В этой модели возможны лишь одинарные и бинарные габитусы кристаллов. В условиях реального морфогенеза габитус кристаллов нередко определяется тремя ПКФ. Двойные комбинации ПКФ, часто не достигнув равновесной формы, переходят границу ее устойчивости, в результате чего в огранении кристалла появляется третья ПКФ. Отразим это на строящейся диаграмме для наиболее часто встречающейся в классе *m*3*m* тройной комбинации {100}/{111}/{110}. Для этого систему уравнений (табл. 2) дополним уравнениями (табл. 3), каждое из которых является аппроксимацией параболической функцией сечения $\eta_{\{111\}}$ = const триаграммы {100}/{111}/{110} (рис. 9). С методикой построения триаграммы можно ознакомиться в [3]. Черными изолиниями на рис. 9 показано изменение формы кристалла (*F*-функции), а красными изолиниями – изменение пересыщения.

Построенная по уравнениям из табл. 2, 3 морфогенетическая диаграмма *REL*-ряда представлена на рис. 10. На диаграмме переход кубооктаэдра с $\eta_{\{111\}}$ = const в поле стабильности ромбододекаэдра показан пунктирными линиями.

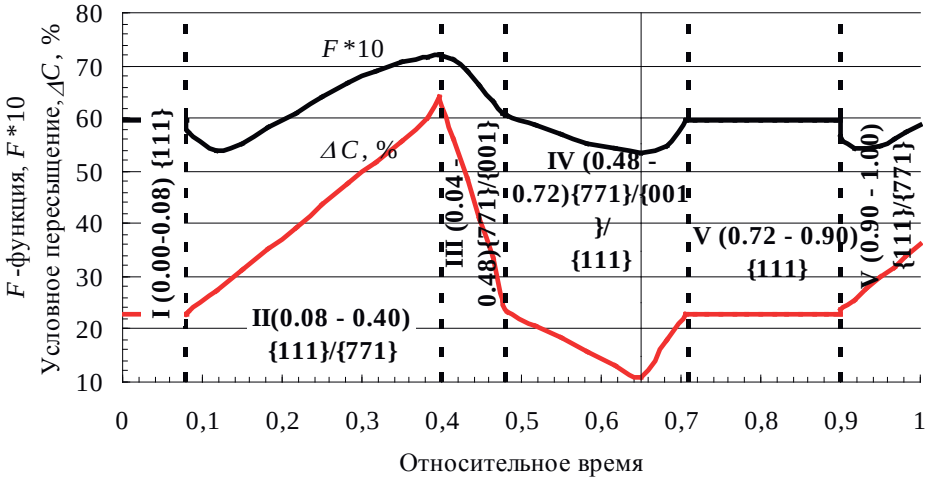



**Рисунок 11. Морфогенетическая диаграммы *CL*-ряда ПКФ кристалла касситерита.**
**Figure 11. Morphogenetic diagrams of CL-series of SCF of cassiterite crystal.**

Проследим эволюцию формы кристалла по траектории диаграммы. На отрезке *ab* равновесной и единственной габитусной формой является куб. При переходе через точку *b* попадаем в поле октаэдра. В этом поле могут сосуществовать две генерации кристаллов. Одна из них, более ранняя, представлена комбинацией куба и октаэдра. Куб является метастабильной формой, его доля в огранении кристалла уменьшается по траектории *bd*, вплоть до полного вырождения. Вторая генерация зарождается и растет в виде октаэдра по всей прямой ***cd.*** Далее переходим точку ***d*** и попадаем в поле устойчивости ромбододекаэдра. В этом поле могут сосуществовать уже три генерации кристаллов. Первая, представленная комбинацией {100}/{111}/{110}, образуется при отставании скорости вырождения куба от скорости изменения пересыщения. Ее траектория проходит по одной из кривых равной доли октаэдра, либо пересекает несколько этих кривых по мере уменьшения доли октаэдра. Вторая генерация представлена комбинацией {111}/{110}, уменьшение в ней доли октаэдра проходит по траектории ***df***. И, наконец, наиболее поздняя третья генерация представлена ромбододекаэдром – равновесной формой на интервале ***ef***. С переходом траектории через точку ***f*** попадаем в совмещенное поле 24-гранников. Здесь теоретически возможно сосуществование до четырех генераций кристаллов (генерации показаны на диаграмме).

Форма кристаллов третьей генерации изменяется по траекториям ***fh, fj, fl*** путем уменьшения доли ромбододекаэдра. Наиболее поздняя четвертая генерация представлена равновесными на прямых ***gh, ij, kl*** формами**,** которые редко являются габитусными. Исключением из этого правила являются минералы семейства гранатов. По мере дальнейшего снижения пересыщения после перехода через точки ***h, j, l*** в поле равновесного состояния гексоктаэдра теоретически возможно сосуществование пяти генераций. На диаграмме отражены траектории последних двух генераций: 4) кривыми ***hn, jn, ln*;** 5) прямой ***mn***. После перехода траектории через точку ***n*** по мере приближения к точке ***o*** кристаллы все больше должны по форме приближаться к шару.

Эволюционные и прерывные морфогенетические ряды могут быть построены для любого класса симметрии и использованы для интерпретации условий образования любых минералов. Переменные ряды не обладают такой универсальностью, их морфогенетические диаграммы строятся для конкретных минералов конкретного месторождения. На рис. 11 в качестве примера приведена морфогенетическая диаграмма переменного *CL*-ряда ПКФ кристалла касситерита, изображенного на рис. 3. На диаграмме поле стадии IV разделено на две части сплошной прямой, проходящей через минимумы *F* и Δ*C*, соответствующие комбинации бипирамид с пинакоидом. Вопрос о положении в эволюционных рядах ПКФ, образованных с участием открытых форм, до конца не ясен и требует дополнительного изучения. В перечне ПКФ каждой стадии на диаграмме не показана тетрагональная призма {110}, поскольку она оставалась формой торможения на всем протяжении роста кристалла. Эффект торможения граней призмы отмечен на кристаллах средней и низшей категорий симметрии многих минералов (кварца, кальцита, рутила, турмалина и др.). Экспериментально доказано, что скорость роста граней призмы кварца даже при значительном перепаде температуры в автоклаве между зонами растворения и роста на два порядка ниже, чем скорость роста основных ромбоэдров [8]. В силу этого удлинение кристаллов особенно средних категорий симметрии часто достигает значительных величин. Возникает туннельный эффект, когда изменение формы кристалла происходит как бы в туннеле, заданном гранями призмы. Причина этого явления недостаточно ясна и требует специального рассмотрения.

Предлагаемые к использованию морфогенетические диаграммы могут служить формализованным инструментарием при изучении условий образования месторождений твердых полезных ископаемых, в которых целевые и сопутствующие им минералы встречаются в виде гранных форм кристаллов.

## Заключение

Форма кристаллов является однозначной функцией пересыщения (переохлаждения расплава, давления пересыщенных паров). Все иные параметры минералообразующих систем влияют на форму кристаллов косвенно, изменяя пересыщение раствора. Для каждой ПКФ, возможной в каком-либо классе симметрии, существует свой непересекающийся интервал пересыщений, в котором данная форма является стабильной и может сохраняться бесконечно долго. Изменение пересыщения влечет за собой изменение формы кристаллов. Поскольку форма является более инертной

категорией в сравнении с подвижной внешней средой, перешедшие в разряд метастабильных ранее появившиеся ПКФ могут сохраняться в огранении кристалла наряду с вновь появившимися стабильными ПКФ значительное время. При переходе минералообразующего раствора через точку насыщения и постепенном росте пересыщения форма кристаллов упрощается и в пределе в его огранении остается одна простая или квазипростая (для минералов средних и низших категорий симметрии) форма с наиболее высоким значением *F*-функции. В случае постепенного снижения пересыщения до точки насыщения в огранении кристаллов появляются ПКФ с большим количеством граней с низкой ретикулярной плотностью и форма их приближается к шару, а *F*-функция стремится к константе 4.836. ПКФ какого-либо класса симметрии, расположенные по возрастанию или убыванию их *F*-функции образуют теоретически возможные морфогенетические ряды ПКФ этого класса. В строении природных кристаллов, как правило, устанавливаются лишь части теоретических рядов, в которых по геологическим причинам часто выпадают отдельные их члены. Морфогенетические ряды кристаллов гидротермального генезиса обычно представлены частями разнонаправленных теоретических рядов, что объясняется пульсационным характером работы гидротермальных систем. При генетической интерпретации морфогенетических рядов *F*-функция рассматривается в качестве количественной меры условного относительного пересыщения. Графическим отображением изменения формы кристаллов в процессе роста являются морфогенетические диаграммы, построенные в координатах «*F*-функция – $\Delta C$», «*F*-функция, $\Delta C$ – относительное время». Построение диаграмм в действительных координатах пересыщения и времени возможно лишь для минералов, скорость роста граней различных ПКФ которых в средах, близких к реальным, хорошо изучена экспериментально.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Григорьев Д. П. Генерации и зарождения минералов // Минер. сб. Львовск. минер. общ. 1949. № 3. С. 13–22.
2. Юшкин Н. П. Теория и методы минералогии. Л.: Наука, 1977. 291 с.
3. Страшненко Г. И. Морфометрия и морфогенез кристаллов. Saarbrücken, Deutschland: LAMBERT Acad. Publ., 2016. 178 с.
4. Страшненко Г. И. Лабораторный метод определения морфометрической функции сложно ограненных кристаллов // Математические исследования в естественных науках: труды XIII Всерос. науч. школы (Апатиты, 17–18 окт. 2016 г.). Апатиты: Изд-во K&M, 2016. С. 97–98.
5. Бакли Г. Рост кристаллов: пер. с англ. М.: ИЛ, 1954. 407 с.
6. Евзикова Н. З. Поисковая кристалломорфология. М.: Недра, 1984. 143 с.
7. Ферсман А. Е. Кристаллография алмаза. Л.: Изд-во АН СССР, 1955. 567 с.
8. Балицкий В. С. Экспериментальное изучение геохимических условий формирования кристаллов кварца. М., 1970. 345 с.
9. Гликин А. Э., Кирьянова Е. В., Синай М. Ю., Сипягин В. В. К проблеме морфогенеза кристаллов в растворах // Физика кристаллизации (проблемы современной кристаллографии). М.: Наука, 2002. С. 1–27.
10. Икорникова Н. Ю. Гидротермальный синтез кристаллов в хлоридных системах. М.: Наука, 1975. 223 с.
11. Стрикленд-Констэбл Р. Ф. Кинетика и механизм кристаллизации. Л.: Недра, 1971. 412 с.
12. Чернов А. А., Кузнецов В. А. Кинетика гидротермальной кристаллизации корунда в различных растворах и гипотеза адсорбционной пленки // Кристаллография. 1969. Т. 14. Вып. 5. С. 879–883.
13. Hosaka M., Miyata T., Sunagava I. Growth and morphology of quartz crystals synthesized above the transition temperature // Journal of Crystal Growth. 1995. Vol. 152. P. 300–306. https://doi.org/10.1016/0022-0248(95)00139-5
14. Franke W. Tracht and habit of synthetic minerals grown under hydrothermal condition // Eur. J. Miner. 1989. № 1. P. 557–566.
15. Трейвус Е. Б. Термодинамические свойства пересыщенных водно-солевых растворов и некоторые выводы о строении пересыщенных жидких сред // Вестник СПбГУ. 2005. Сер. 7. Вып. 2. С. 3–11.
16. Шубников А. В. О взаимосвязи между кристаллическим индивидом и кристаллической средой // Кристаллография и минералогия: тр. Федор. юбил. сессии. Л., 1972. С. 25–28.
17. Kiryanova E. V. New effects of crystal-solution phase equilibria in a model system $NaNO_3$–$H_2O$ // J. Cryst. Growth. 2003. Vol. 253, № 1–4. P. 452–459. http://dx.doi.org/10.1016/S0022-0248(03)01021-2
18. Страшненко Г. И. Морфокинетический анализ кристаллов кварца // Математические исследования в естественных науках: труды XIV Всерос. науч. школы (Апатиты, 23 окт. 2017 г.). Апатиты: Изд-во K&M, 2017. С. 97–118.
19. Kiryanova E. V., Glikin A. E. The laws of fluorite and calcite habit formation in terms of the morphogenetic structural-chemical concept // J. Cryst. Growth. 1999. Vol. 198-199. P. 697–703. https://dx.doi.org/10.1016/S0022-0248(98)01148-8
20. Van der Voort E. Observations on growth form and habit of potassium nitrate as a function of the temperature // J. Cryst. Growth. 1990. Vol. 100, № 3. P. 539–544. https://dx.doi.org/10.1080/0889311X.2013.838673
21. Минералы: справочник. Т. 1. Самородные элементы, интерметаллические соединения, карбиды, нитриды, фосфиды, арсениды, антимониды, висмутиды, сульфиды, селениды, теллуриды / ред. Э. М. Бонштедт-Куплетская, Ф. В. Чухров. М.: Изд-во АН СССР, 1960. 617 с.
22. Файзиев А. Р. Кристалломорфология флюорита из месторождений и рудопроявлений Центрального Таджикистана // Минералы и парагенезисы минералов. Л.: Наука, 1978. С. 160–167.
23. Костов И. Генетические типы габитусов кристаллов // Минер. сб. Львовск. минер. общ. 1962. № 16. С. 75–90.
24. Трубин В. И. К вопросу о связи формы кристаллов с термодинамическими условиями их роста // ДАН СССР. 1970. Т. 190, № 4. С. 835–838.

*Статья поступила в редакцию 5 сентября 2018 г.*

УДК 548.4 https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-1-67-79

# Mechanisms and causes of changes in the shape of crystals during their growth

**Grigory Ivanovich STRASHNENKO***

Geologo-promyshlennoe predpriyatiye "Tsentral'no-Ural'skoye", Ekaterinburg, Russia

***The relevance*** of this paper consists in the further development of a new direction in mineralogical crystallography — dynamic crystallomorphology, which allows one to obtain information on physical and chemical conditions of formation of mineral deposits by changing the form of crystals during their growth.
***Purpose of the work***: theoretical substantiation and development of the method of morphokinetic analysis and methods for constructing morphogenetic diagrams of natural crystals.
***Research methodology***: the study of mechanisms and causes of the change in the shape of crystals based on the observed mineralogical facts and idealized geometric models, as well as morphometric analysis of combination shapes of crystals.
***Results***. Four kinematic mechanisms for preserving and changing the shape of crystals are considered. It is proved that the crystal shape of a certain mineral is directly determined by the supersaturation of the solution (undercooling a melt, the pressure of supersaturated vapor). All other factors, such as temperature, pressure, *pH*, redox potential *Eh*, activity of other ions involved in the mineral-forming process, affect the shape of crystals indirectly changing the solution supersaturation. It was shown that, depending on the direction and rate of change of supersaturation, 7 morphogenetic rows of closed or quasi-closed simple crystallographic forms (SCF) can be distinguished in each class of symmetry. Each row represents a SCF sequence in which each successive SCF replaces the previous one. Morphogenetic series were distinguished: 1) regressive evolutionary; 2) progressive evolutionary; 3) regressive intermittent; 4) progressive intermissive; 5) regressive shocking; 6) progressive shocking; 7) variable. A method is proposed for constructing morphogenetic diagrams using a diagram for a regressive evolutionary SCF series as an example (*m3m* symmetry of a cubic syngony). The morphogenetic diagram is given of the variable series based on the example of a particular cassiterite crystal.

*Keywords*: mineral, crystal, form, *F*-function, supersaturation, morphogenetic series, morphogenetic diagram.

## REFERENCES

1. Grigoriev D. P., 1949, *Generatsii i zarozhdeniya mineralov* [Generations and origin of minerals]. Mineralogical collection of works of Lviv Mineralogical Society, no. 3, pp. 13–22.
2. Yushkin N. P. 1977, *Teoriya i metody mineralogii* [Theory and methods of Mineralogy], 291 p.
3. Strashnenko G. I. 2016, Morphometry and morphogenesis of crystals. Saarbrücken, Deutschland: LAMBERT Acad. Publ., 178 p.
4. Strashnenko G. I. 2016, Laboratory method for determining the morphometric function of complex-faceted crystals. Mathematical research in natural sciences: proceedings of XIII All-Russian scientific school (Apatites, 17–18 Oct. 2016). Apatites, pp. 97–98.
5. Bakli G. 1954, Crystal Growth. Moscow, 407 p.
6. Evzikova N. Z. 1984, *Poiskovaya kristallomorfologiya* [Prospecting crystallomorphology]. Moscow, 143 p.
7. Fersman A. E. 1955*, Kristallografiya almaza* [Diamond crystallography], 567 p.
8. Balitsky V. S. 1970, *Eksperimental'noye izucheniye geokhimicheskikh usloviy formirovaniya kristallov kvartsa* [Experimental study of the geochemical conditions of the formation of quartz crystals]. Moscow, 345 p.
9. Glikin A. C., Kiryanova E. V., Sinai M. Yu., Sipyagin V. V. 2002*, K probleme morfogeneza kristallov v rastvorakh* [About the problem of crystal morphogenesis in solutions]. Physics of crystallization (issues of modern crystallography). Moscow, pp. 1–27.
10. Ikornikova N. Yu. 1975, *Gidrotermal'nyy sintez kristallov v khloridnykh sistemakh* [Hydrothermal synthesis of crystals in chloride systems]. Moscow, 223 p.
11. Strickland-Constable R. F. 1971, Kinetic and mechanism of crystallization, 412 p.
12. Chernov A. A., Kuznetsov V. A. 1969, Kinetics of hydrothermal crystallization of corundum in various solutions and the hypothesis of an adsorption film. *Kristallografiya* [Crystallography Reports], vol. 14, issue 5, pp. 879–883. (*In Russ*.)
13. Hosaka M., Miyata T., Sunagava I. 1995, Growth and morphology of quartz crystals synthesized above the transition temperature. *Journal of Crystal Growth*, vol. 152, pp. 300–306. https://doi.org/10.1016/0022-0248(95)00139-5
14. Franke W. 1989, Tracht and habit of synthetic minerals grown under hydrothermal condition. *European Journal of Mineralogy*, no. 1, pp. 557–566.
15. Treivus E. B. 2005, Thermodynamic properties of supersaturated water-salt solutions and some conclusions about the structure of supersaturated fluid media. *Vestnik SPbGU* [Vestnik of Saint Petersburg University], series 7, issue 5, pp. 3–11. (*In Russ*.)
16. Shubnikov A. V. 1972*, O vzaimosvyazi mezhdu kristallicheskim individom i kristallicheskoy sredoy* [About the relationship between the crystalline individual and the crystalline medium]. Crystallography and mineralogy: proceedings of Anniversary Fedorov Session, pp. 25–28.
17. Kiryanova E. V. 2003, New effects of crystal-solution phase equilibria in a model system $NaNO_3$–$H_2O$. *Journal of Crystal Growth*, vol. 253, no. 1–4, pp. 452–459. http://dx.doi.org/10.1016/S0022-0248(03)01021-2
18. Strashnenko G. I. 2017, *Morfokineticheskiy analiz kristallov kvartsa* [Morphokinetic analysis of quartz crystals]. Mathematical research in natural sciences: proceedings of XIII All-Russian scientific school (Apatites, 23 Oct. 2017). Apatites, pp. 97–118.
19. Kiryanova E. V., Glikin A. E. 1999, The laws of fluorite and calcite habit formation in terms of the morphogenetic structural-chemical concept. *Journal of Crystal Growth*, vol. 198–199, pp. 697–703. https://dx.doi.org/10.1016/S0022-0248(98)01148-8
20. Van der Voort E. 1990, Observations on growth form and habit of potassium nitrate as a function of the temperature. *Journal of Crystal Growth*, vol. 100, no. 3, pp. 539–544. https://dx.doi.org/10.1080/0889311X.2013.838673
21. 1960, *Mineraly* [Minerals], reference book. Vol. 1. Native elements, intermetallic compounds, carbides, nitrides, phosphides, arsenides, antimonides, bismuthides, sulfides, selenides, tellurides. Ed. by E. M. Bonshtedt-Kupletskaya, F. V. Chukhrov. Moscow, 617 p.

* ✉ *strashnenko_gi@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-2008-8359

22. Faiziev A. R. 1978, *Kristallomorfologiya flyuorita iz mestorozhdeniy i rudoproyavleniy Tsentral'nogo Tadzhikistana* [Crystalomorphology of fluorite from deposits and ore manifestations of Central Tajikistan]. In: Minerals and paragenesis of minerals, pp. 160–167.
23. Kostov I. 1962, Genetic crystal habit types. Mineralogical collection of works of Lviv Mineralogical Society, no. 16, pp. 75–90.
24. Trubin V. I. 1970, On the question of the relationship between the shape of crystals and the thermodynamic conditions of their growth. *Doklady Akademii nauk* [Doklady Earth Sciences], vol. 190, no. 4, pp. 835–838. (*In Russ.*)

*The article was received on September 5, 2018*

УДК 624.191.22 https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-1-80-87

# Численное моделирование устойчивости лба забоя в зоне неоднородности при недренированной модели массива

**Александр Васильевич АЛЕКСЕЕВ***,
**Павел Эдуардович ВЕРБИЛО****

Санкт-Петербургский горный университет, Россия, Санкт-Петербург

***Актуальность работы.*** Оценка устойчивости обнаженного забоя является актуальной задачей ввиду того, что часть выработок метрополитена возводится горным способом, с креплением лба забоя вручную, в то время как косвенные методы прогнозирования инженерно-геологических и гидрогеологических условий впереди лба забоя свидетельствуют о наличии мест локального разуплотнения и обводнения, способных повлиять на устойчивость.
***Цель работы.*** Оценка зоны влияния и типа дренирования элемента неоднородности на устойчивость проходческого забоя, пройденного в массиве протерозойских глин.
***Метод и методология.*** В качестве метода исследования выбран метод конечных элементов, реализуемый в программном комплексе PLAXIS. В качестве геомеханической модели поведения грунта принята модель упрочняющегося грунта Hardening Soil Small Strain. Рассмотрены расчетные ситуации деформирования незакрепленного лба забоя, приближающегося к водонасыщенному элементу неоднородности, при моделировании элемента мощностью 1 и 4 м и изменении характера фильтрации воды вдоль элемента.
***Результаты работы.*** При различии деформационных свойств расчетных грунтовых элементов на 30 % и заданном уровне грунтовых вод как в случае дренирования, так и недренирования происходит увеличение перемещений при подходе проходческого забоя к зоне влияния неоднородности. Размер зоны влияния зависит от выбранного типа дренирования элемента неоднородности.
***Область применения результатов, изложенных в статье.*** Результаты, изложенные в статье, при условии определения параметров модели, соответствующих условиям проходки, могут быть использованы при оценке устойчивости лба проходческого забоя в зоне неоднородности, являющейся водопроводящим каналом.
***Вывод.*** При проектировании строительства линейного подземного сооружения в зоне неоднородности необходимо оценивать устойчивость лба забоя с использованием численного моделирования. При моделировании элемента неоднородности необходимо учитывать степень влагонасыщения, мощность элемента неоднородности и характер фильтрации воды вдоль элемента неоднородности.

*Ключевые слова:* недренированный массив; устойчивость; забой тоннеля; зона неоднородности; численный анализ; метод конечных элементов.

## Введение

Понятие «устойчивость» в подземном строительстве имеет множество определений. Рассмотрим основные определения устойчивости, приведенные в учебно-методической литературе и нормативных документах. Условно устойчивость разделяется на устойчивость грунтов и конструкций. Н. С. Булычев под устойчивостью горных пород понимает «способность сохранить форму и размеры обнажений, образуемых при строительстве горных выработок и подземных сооружений» [1]. А. Г. Протосеня ограничивает устойчивое состояние допустимыми пределами изменения формы и размеров выработки, обусловленными правилами эксплуатации и техникой безопасности. Вместе с тем под устойчивостью обнажений пород понимается состояние, при котором уровни напряженности и деформируемости не приводят к вывалам, разрушениям и смещениям, препятствующим эксплуатации горной выработки [2]. В нормативной документации определение устойчивости изменяется в зависимости от области регулирования. Так, СП «120.13330.2012 Метрополитены» определяет устойчивость как «способность грунтов сохранять в забое (в данных инженерно-геологических условиях, при данном способе горнопроходческих работ и конкретной площади забоя) состояние равновесия без каких-либо явных деформаций в течение времени, необходимого для установки крепления». Понятие явных деформаций остается нераскрытым. Документ, регламентирующий строительство предприятий по добыче полезных ископаемых (*СП 91.13330.2012 Подземные горные выработки*) разделяет устойчивость горной выработки и устойчивость окружающего выработку массива. Под устойчивостью горной выработки понимается «способность выработки функционировать в определенных условиях с заданными параметрами в течение требуемого отрезка времени», тогда как под устойчивостью окружающего выработку массива горных пород – «способность массива в определенных условиях сохранять равновесие». Данное определение схоже с определением, приведенным в документе, устанавливающем основные геотехнические требования и распространяющимся на проектирование новых и реконструкцию существующих подземных сооружений, в котором вводится коэффициент устойчивости $\gamma_{st}$, определяемый для конкретной поверхности скольжения как «соотношение сдвиговой прочности грунта к касательным напряжениям, действующим на этой поверхности скольжения» (*СП 248.1325800.2016 Сооружения подземные. Правила проектирования*). Стоит учесть, что документ не распространяется на сооружения специального назначения.

Таким образом, под устойчивостью в дальнейшем будем понимать понятие, закрепленное «СП 120.13330.2012 Метрополитены», и проверяя коэффициент устойчивости, будем ориентироваться на величину деформаций поверхности забоя при установившемся равновесии в массиве.

В общем случае под неоднородностью грунтового массива по какому-либо параметру в пределах рассматриваемого объема понимается зависимость этого параметра от координат точки опробования [2]. Вместе с тем понятие неоднородности имеет относительный характер. По ГОСТ 20522–2012 требуется оценивать неоднородность грунта с помощью коэффициента вариации характеристик грунта[1]. Для сравнения неоднородности по разным параметрам может при-

* ✉ a1exeev@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0003-2581-4433
**pashaverbilo@mail.ru
https://orcid.org/0000-0001-6776-5866

меняться сравнительный коэффициент вариации. Вводится термин «элемент неоднородности», определяющий наибольший объем однородной горной породы, отличающейся по своим свойствам от соседней с ней. По классификации, отраженной в пособии по геомеханике [2], различают 4 порядка неоднородности по размеру элемента неоднородности. Для целей проектирования ГОСТ 20522–2012 условно укрупняет порядки неоднородности и определяет расчетный грунтовый элемент (РГЭ) и инженерно-геологический элемент (ИГЭ). Несмотря на то, что задача об определении объема грунта в РГЭ и ИГЭ может потребовать широкого спектра исследований, в процессе строительства метрополитена, в переделах одного ИГЭ могут наблюдаться участки грунта, отличающиеся порядком неоднородности, находящиеся в разуплотненном состоянии и являющиеся водопроводящими каналами. Кроме того, неоднородность возникает в зонах биохимического выветривания и активной жизнедеятельности природной и привнесенной микробиоты [3]. В подобных участках наблюдается изменение деформационных и прочностных свойств в пределах одного инженерно-геологического элемента.

Проходка тоннелей в слабом водоносном грунте особенно требовательна при высоких давлениях воды и в неоднородных образованиях с переменной водопроницаемостью. Гидравлическая неоднородность может привести к локально высоким гидравлическим градиентам, которые неблагоприятны для устойчивости.

Дренированный тип поведения характерен для сухих грунтов, а также для грунтов с высокой водопроницаемостью. Оценка устойчивости по дренированной схеме рекомендуется при прогнозировании долгосрочной реакции грунта [4].

При моделировании недренированного поведения при заданном уровне грунтовых вод скелет грунта имеет связную воду, в которой формируется избыточное поровое давление. Оценку устойчивости по недренированной схеме рекомендуется проводить при малой водопроницаемости материала и при прогнозировании кратковременной реакции грунта [4].

В литературе отражено множество примеров резкой смены горно-геологических условий [5–8]. В общем на прорыв воды, плывунов и текучих обводненных грунтов в период строительства подземных сооружений в СССР с 1981 по 1990 г. приходилось около 30 % аварийных случаев [7].

Чередующиеся зоны переменной прочности, проницаемости и толщины приводят к изменчивости в геомеханическом поведении грунта во время проходки тоннеля. Отдельные слабые зоны, состоящие из щебня или валуноподобного материала низкого сцепления и проводящие воду, в случае внезапного столкновения могут привести к масштабной потере устойчивости и последующему затоплению значительной части тоннеля.

Подобные чередующиеся зоны были зафиксированы косвенными методами прогнозирования горно-геологических условий. Как отмечают исследователи в публикации [9]: «…во время проходки тоннелей щитом с грунтопригрузом, в г. Санкт-Петербурге, при прогнозе горно-геологических условий впереди лба забоя на трассе тоннеля, длиной 1872 м были выявлены многочисленные интервалы разуплотненных водонасыщенных грунтов, а также участки со скоплением гравийно-галечникового материала и валунов». Характерный разрез представлен на рис. 1.

Таким образом, целью данной статьи является оценка зоны влияния неоднородности и выявление динамики изменения деформирования лба забоя относительно деформирования в однородном массиве при условии моделирования элемента неоднородности дренированным и недреннированным. Для достижения данной цели решаются задачи о моделировании элемента неоднородности в двух выше обозначенных состояниях.

Оценку влияния элемента неоднородности массива на деформирование лба проходческого забоя проводили ряд исследователей [6, 10, 11]. В статьях рассмотрено влияние неоднородности относительно параметров анизотропии деформационных свойств, неоднородности по признаку водопроницаемости. Выбор способа повышения устойчивости в зоне неоднородности представлен в публикации [12]. Оценка устойчивости лба забоя при проходке щитом с пригрузом при учете избыточного порового давления представлена в публикации [13].

В качестве метода исследования выбран метод конечных элементов, реализованный в программе PLAXIS 3D 2017, позволяющий моделировать поровое давление. Сетка 10 узловых тетраэдальных элементов имеет сгущение в извлекаемых объемах тоннеля и в элементе неоднородности. Радиально, на расстоянии 4 м от тоннеля, по контуру также имеется сгущение сетки. Таким образом, модель состоит из 25 287 элементов и 37 099 узлов. Проходка тоннеля диаметром $D$ = 8 м рассматривается на глубине 30 м. Уровень грунтовых вод $H_w$ задается равным 2 м от поверхности земли (рис. 2). Свойства однородного массива (рис. 2, а – 1) и элемента неоднородности (рис. 2, а – 2), используемые при расчете, представлены в таблице. Мощность элемента неоднородности задавалась 1 и 4 м. Для моделирования деформирования лба забоя выбрана модель грунта Hardening Soil Small Strain, как подходящая для оценки деформаций в массиве [4, 13–16].

Так как элемент неоднородности имеет вертикальную ориентацию, начальные напряжения в массиве рассчитывались под влиянием гравитации. В целях стабилизации деформаций после начального шага расчета задавался шаг расчета (*Plastic*), на котором не происходило никакого изменения объема модели.

Параметры модели подбирались на основании результатов лабораторных испытаний протерозойских глин, отобранных из забоев станций метро «Бухарестская» и «пр. Славы» и проведенных по консолидированно-недренированной схеме с допущением того, что кривые деформирования дренированных и недренированных испытаний, по сути, схожи.

При моделировании элемента неоднородности недренированным однородный массив задавался как сухой кластер. При совместном деформационно-фильтрационном расчете и задании элемента неоднородности дренированным поровое давление однородного массива интерполировалось на каждом шаге расчета.

В случае учета уровня грунтовых вод (рис. 2, а) элемент неоднородности служит водопроводящим каналом, фильтрационные свойства которого также приведены в таблице.

[1]ГОСТ 20522–2012 Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний. 2012.

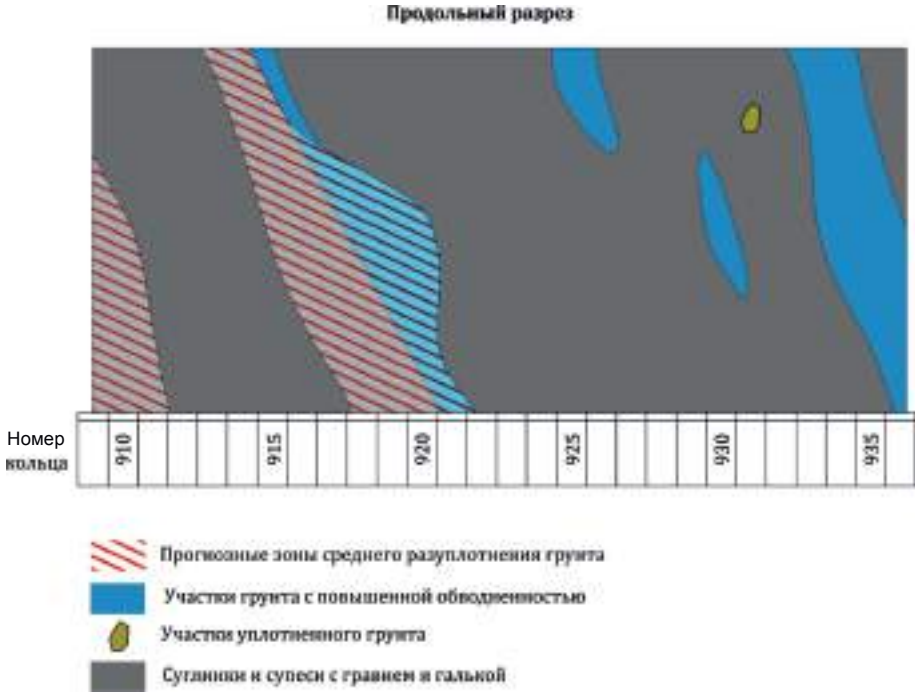



**Рисунок 1. Результаты прогноза инженерно-геологических и гидрогеологических условий впереди лба забоя тоннеля [9].**
**Figure 1. The results of the forecast of engineering-geological and hydrogeological conditions in front of the forehead of the tunnel face [9].**

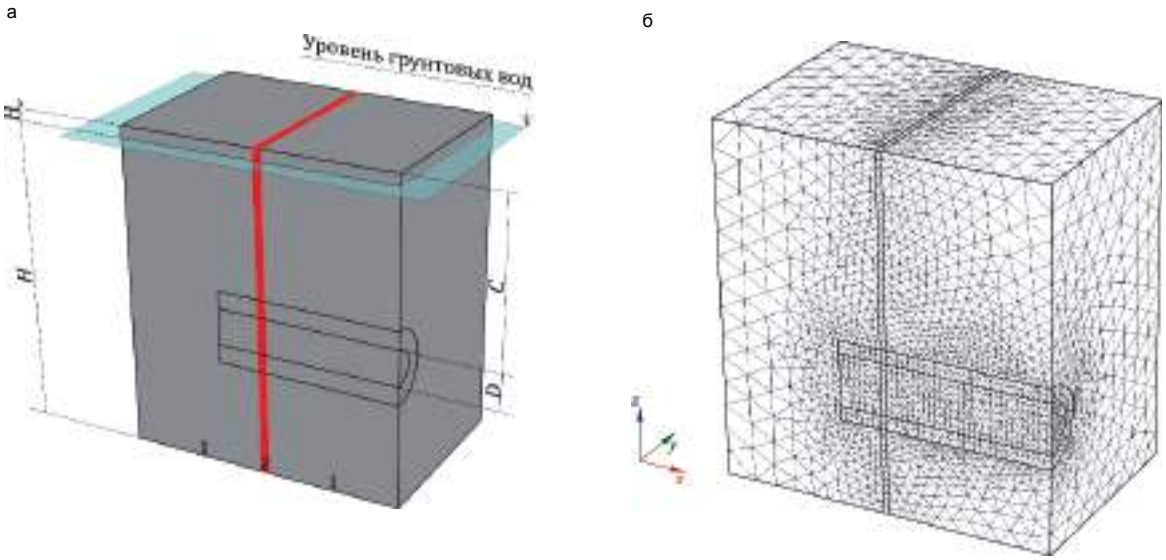



**Рисунок 2. Расчетная схема массива – а и сетка конечных элементов – б.**
**Figure 2. The design scheme of the array is a and the finite element grid is б.**

## Результаты

Результаты моделирования представлены на рис. 4–7. Результаты, соответствующие текущей стадии проходки $u_x^{\mathrm{exc}(n-1)}$, оценивались относительно фоновых устоявшихся узловых перемещений $u_x^{\mathrm{het}}$, сложившихся в однородном массиве на каждой стадии проходки. Допускаемая погрешность расчетов принималась 1 %. Устоявшимися считались средние перемещения с допустимой погрешностью оценки 5 %. Зона влияния неоднородности определяется в рамках данной статьи как расстояние от элемента неоднородности, начиная с которого узловые перемещения (при условии соблюдения критерия прочности) изменяются более чем на 5 % относительно устоявшихся перемещений.

Результаты представлены для случая обнажения лба забоя на период одной рабочей смены. Время совместного деформационно-фильтрационного расчета, использованного при моделировании неоднородности дренированным массивом, составляло 8 ч. На всех этапах деформирования лба забоя выполнялось условие прочности.

Недостатком использования параметров эффективной прочности $c'$ и $\varphi'$ в комбинации с типом поведения материала *Undrained (A)* является то, что полученное сопротивление недренированному сдвигу может отличаться от своего реального значения из-за различия фактической и заданной траектории напряжений, поэтому кроме критерия прочности рекомендуется сравнивать полученное напряженное состояние с настоящим реальным сопротивлением сдвигу $|\sigma_1 - \sigma_3| \le 2s_u$ [2].

**Свойства однородного массива и элемента неоднородности.**
**Properties of a homogeneous array and an element of heterogeneity.**

| Показатель | Однородный массив | Элемент неоднородности | |
|---|---|---|---|
| | (1) | (2) | |
| Модель материала | HS small strain | HS small strain | |
| Тип дренирования | Undrained (A) | Drained | Undrained (A) |
| Объемный вес неводонасыщенного грунта $\gamma_{unsat}$ кН/м$^3$ | 19,50 | 19,50 | |
| Объемный вес водонасыщенного грунта $\gamma_{sat}$, кН/м$^3$ | 21 | 21 | |
| Секущий модуль деформаций на 50 % прочности $E_{50}^{ref}$, МПа | 350 | 240 | |
| Касательный модуль при первичном нагружении в условиях изокомпрессионного сжатия $E_{oed}^{ref}$, МПа | 380 | 260 | |
| Модуль при разгружении $E_{ur}^{ref}$, МПа | 900 | 735 | |
| Показатель степени зависимости модуля деформаций от уровня бокового давления $m$ | 0,8 | 0,8 | |
| Начальный коэффициент пористости $e_{int}$ | 0,50 | 0,85 | |
| Эффективное сцепление $c'$, кПа | 1000 | 1000 | |
| Эффективный угол внутреннего трения $\varphi'$, град. | 23 | 23 | |
| Пороговое значение сдвиговой деформации $\gamma_{0,72}$ | $0,15 \cdot 10^{-3}$ | $0,15 \cdot 10^{-3}$ | |
| Опорное значение модуля сдвига при сверхмалых деформациях $G_0^{ref}$, МПа | 1000 | 735 | |
| Коэффициент Пуассона при разгрузке $\nu_{ur}$ | 0,20 | 0,20 | |
| Опорное давление $p_{ref}$, кПа | 100 | 100 | |
| Коэффициент бокового давления грунта в состоянии нормального уплотнения $K_0$ | 0,6093 | 0,6093 | |
| Коэффициент разрушения $R_f$ | 0,45 | 0,45 | |
| Критерий прочности | Кулон–Мор | Кулон–Мор | |
| Коэффициент фильтрации $k_x$, совпадающий с главной осью $x$, м/сут | $2 \cdot 10^{-3}$ | $6,15 \cdot 10^{-3}$ | |
| Коэффициент фильтрации $k_y$, совпадающий с главной осью $y$, м/сут | $2 \cdot 10^{-3}$ | $6,15 \cdot 10^{-3}$ | |
| Коэффициент фильтрации $k_z$, совпадающий с главной осью $z$, м/сут | $2 \cdot 10^{-6}$ | $6,15 \cdot 10^{-3}$ | |

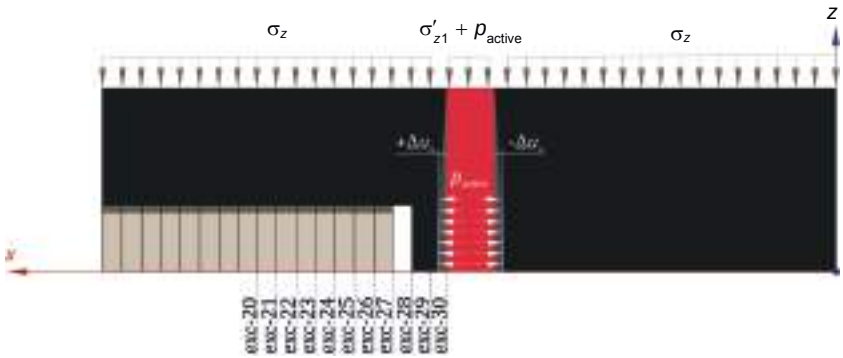



**Рисунок 3. Схема, поясняющая положение забоя в массиве.**
**Figure 3. Scheme explaining the position of the face in the array.**

По мере приближения проходческого забоя к зоне неоднородности (рис. 3, этапы проходки, соответствующие положению проходческого забоя в положении exc-23–exc-29) увеличивается величина деформаций проходческого забоя, проходимого еще в однородном массиве. Это связано как с формированием избыточного порового давления в неоднородности (рис. 5), воздействующего в свою очередь на разгружаемый проходкой однородный массив, так и с отличием деформационных свойств расчетных элементов. Интересным представляется факт уменьшения величины деформирования после преодоления неоднородности. Это вызвано тем, что активное поровое давление, воздействующее со стороны неоднородности, вызывало увеличение полной величины бокового давления и провоцируя узловые перемещения еще до подхода забоя к неоднородности. При моделировании элемента неоднородности, равного 1 м, зона влияния неоднородности равна одному диаметру тоннеля.

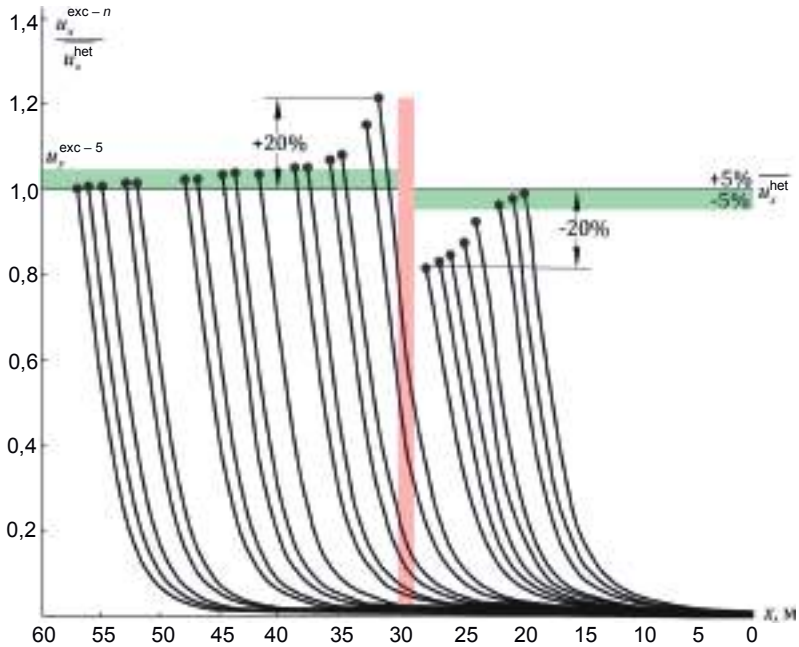



**Рисунок 4. Относительное перемещение лба забоя на характерных этапах проходки при моделировании неоднородности (мощность 1 м) как недренированного объема при заданном уровне грунтовых вод.**
**Figure 4. Relative movement of the forehead of the face at typical stages of penetration while simulation of heterogeneity (thickness is 1 m) as undrained volume at a given level of groundwater.**

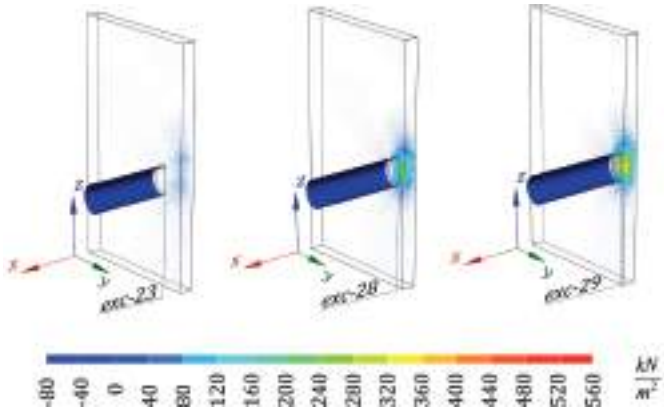



**Рисунок 5. Процесс формирования избыточного порового давления при подходе к обводненной неоднородности.**
**Figure 5. The process of formation of excess pore pressure when approaching water inhomogeneity.**

В случае изменения мощности неоднородности до размера 4 метров (рисунок 6), перемещения в однородном грунтовом массиве при подходе забоя к неоднородности увеличиваются на 60%, относительно устоявшихся узловых перемещений. Величина узловых перемещений лба забоя так же, как и в предыдущем случае, после прохождения через элемент неоднородности уменьшается. При моделировании элемента неоднородности равным 4 м, зона влияния при подходе лба забоя, равна одному диаметру проводимого тоннеля.

В случае моделирования неоднородности дренированным массивом с заданном уровнем грунтовых вод (рис. 7) вода свободно фильтруется по элементу неоднородности, создает напор в уровне тоннеля. Зона влияния неоднородности уменьшается до радиуса тоннеля, однако величина смещений резко увеличивается в 9 раз относительно устоявшихся.

## Заключение

При моделировании неоднородности в массиве глинистых грунтов необходимо учитывать степень влагонасыщения, мощность элемента неоднородности. При различии деформационных свойств расчетных грунтовых элементов на 30 % и заданном уровне грунтовых вод как в случае дренирования, так и в недренированном случае, происходит увеличение перемещений при подходе проходческого забоя к зоне влияния неоднородности. При строительстве подземных сооружений метрополитена необходимо осуществлять выбор параметров крепления лба забоя исходя из определения устойчивости, приведенного в СП 120.13330.2012, с оговоркой о том, что явными деформациями могут считаться деформации, превышающие (при принятой технологии проходки и инженерно-геологических условиях) средневзвешенные деформации. Под средневзвешенными деформациями следует понимать такой уровень деформаций лба забоя,

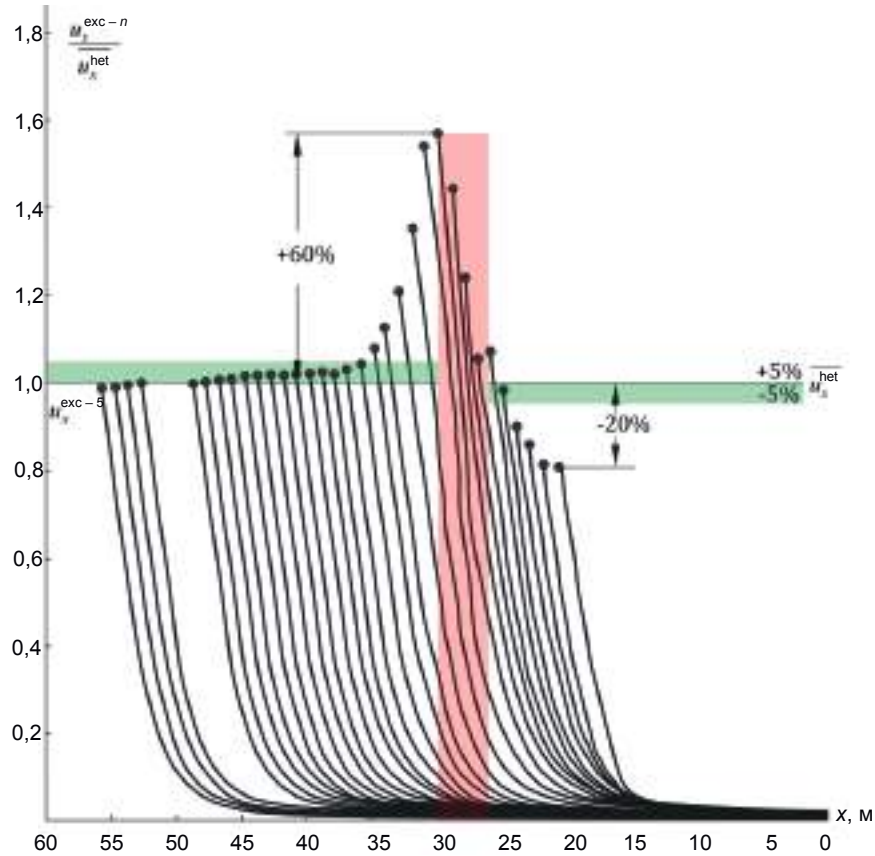



**Рисунок 6. Деформирование лба забоя на каждом этапе проходки при моделировании неоднородности (4 м) как недренированного объема и заданном уровне грунтовых вод.**
**Figure 6. The deformation of the forehead of the face at each stage of heading while simulation of heterogeneity (4 m) as an undrained volume and a given level of groundwater.**

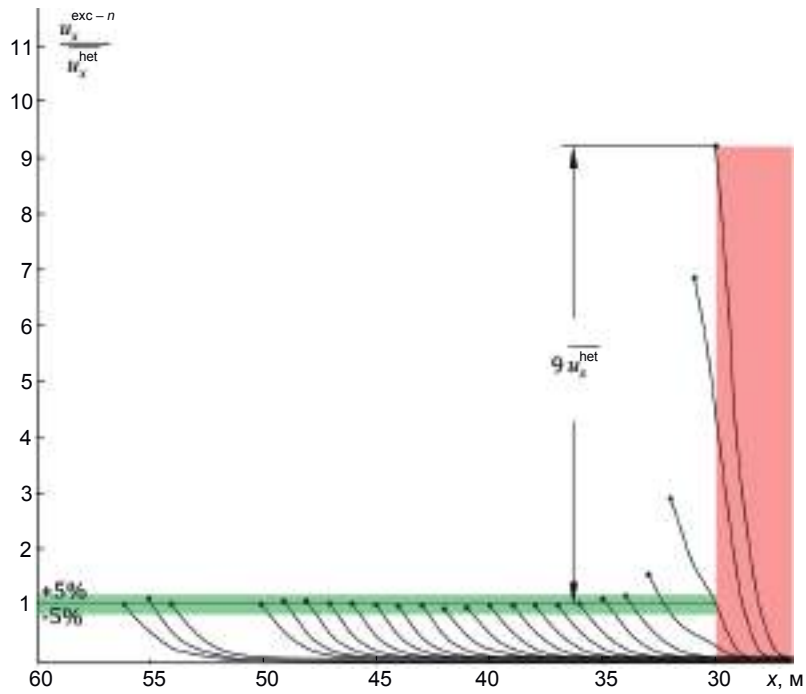



**Рисунок 7. Деформирование лба забоя вдоль оси *x* на каждом этапе проходки при моделировании неоднородности как дренированного объема и заданном уровне грунтовых вод.**
**Figure 7. The deformation of the forehead of the face along the x axis at each stage of heading while simulation of heterogeneity as a drained volume and a given level of groundwater.**

который по опыту строительства не приводил к недопустимым деформациям как на поверхности, так и в уровне проводимого тоннеля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Булычев Н. С. Механика подземных сооружений в примерах и задачах. М.: Недра, 1989. 270 с.
2. Протосеня А. Г., Тимофеев О. В. Геомеханика. СПб.: СПГГИ, 2008. 117 с.
3. Дашко Р. Э., Александрова О. Ю., Котюков П. В., Шидловская А. В. Особенности инженерно-геологических условий Санкт-Петербурга // Развитие городов и геотехническое строительство. 2011. № 1. С. 1–47.
4. Brinkgreve R. B. J., Kumarswamy S., Swolfs W. M., Foria F. PLAXIS 3D. Руководство пользователя. СПб.: ООО “НИП-Информатика,” 2017. 816 с.
5. Anagnostou G., Schuerch R., Ramoni M. TBM tunnelling in complex rock formations // Interventi e opere nelle formazioni complesse: XV MIR Conference. Torino, 2014. P. 1–25.
6. Zingg S., Anagnostou G. Tunnel face stability and the effectiveness of advance drainage measures in water-bearing ground of non-uniform permeability // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2018. – Vol. 51, № 1. P. 187–202. https://doi.org/10.1007/s00603-017-1312-1
7. Власов С. Н., Маковский Л. В., Меркин В. Е. Аварийные ситуации при строительстве и эксплуатации транспортных тоннелей и метрополитенов. 2-е изд. М.: ТИМР, 2000. 201 с.
8. Лыхин П. А. Практика тоннелестроения в XX веке. Пермь: ИД «Пресстайм», 2009. 327 с.
9. Безродный К. П., Лебедев М. О., Марков В. А., Старков А. Ю. Геотехническое обеспечение при строительстве двухпутного перегонного тоннеля с помощью ТПМК // Метро и тоннели. 2015. № 5. С. 16–18.
10. Cantieni L. Spatial effects in tunneling through squeezing ground. 2011. https://doi.org/10.3929/ethz-a-006397593
11. Алексеев А. В. Деформации лба забоя при проходке тоннеля в зоне структурно-механической неоднородности // ГИАБ. 2018. № 12. С. 48–56. https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-12-0-48-56
12. Vermeer P. A., Ruse N., Marcher T. Tunnel heading stability in drained ground // Felsbau. 2002. Vol. 20, № 6. P. 8–18.
13. Broere W. Influence of excess pore pressures on the stability of the tunnel face // Proceedings of the ITA World Tunneling congress: (Re) Claiming the underground space, Amsterdam: Swets & Zeitlinger B.V., 2003. P. 759–765.
14. Demenkov P. A., Trushko O. V., Potseshkovskaya I. V. Numerical experiments on the modeling of compensatory injection for the protection of buildings during tunneling // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2018. Vol. 13, № 23. P. 9161–9169.
15. Карасев М. А. Прогноз геомеханических процессов в слоистых породных массивах при строительстве подземных сооружений сложной пространственной конфигурации в условиях плотной городской застройки: дис. … д-ра техн. наук. СПб., 2017. 307 с.
16. Wang W.D., Li Q., Xu Z.H. Determination of parameters for hardening soil small strain model of Shanghai clay and its application in deep excavations // Proceedings of the 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Seoul, 2017. P. 2065–2068.

*Статья поступила в редакцию 6 ноября 2018 г.*

УДК 624.191.22 https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-1-79-87

# Numerical modeling of stability of the forehead of the face in the area of heterogeneity with undrained array model

**Aleksandr Vasil'evich ALEKSEEV***,
**Pavel Eduardovich VERBILO****,

Saint Petersburg Mining University

***Relevance of the work.*** Estimation of the stability of free face is an important task due to the fact that part of headings of tube railroad is erected by mining, with the forehead of the face fixed manually, while indirect methods of forecasting engineering-geological and hydrogeological conditions before the forehead of the face indicate the presence of local softening and watering capable affect sustainability.
***Purpose of the work.*** Estimation of the zone of influence and the type of drainage of the element of heterogeneity on the stability of the tunnel face passed in the array of Proterozoic clays.
***Method and methodology.*** The finite element method used in the PLAXIS software package was chosen as the research method. The Hardening Soil Small Strain hardening soil model was selected as a geomechanical model of soil behavior. The design situations of deforming the unfixed forehead of the face approaching the water-saturated element of heterogeneity, are considered when simulating an element with a capacity of 1 and 4 m and changing the nature of water filtration along the element.
***Results of the work.*** When deformation properties of the calculated soil elements differ by 30% with the given level of groundwater, both in the case of drainage and nondrainability, an increase in displacements occurs when the tunneling face approaches the zone of influence of heterogeneity. The size of the zone of influence depends on the chosen type of drainage of the element of heterogeneity.
***Applicable scope of the results described in the paper.*** The results described in the paper (subject to determining the parameters of the model that meet the conditions of penetration) can be used to estimate the stability of the forehead of the tunnel face in the area of heterogeneity, which is the water supply canal.
***Conclusion***. When designing construction of a linear underground facility in an area of heterogeneity, it is necessary to evaluate the stability of the forehead of the face using numerical modeling. When modeling an element of heterogeneity, it is necessary to take into account the degree of water saturation, the thickness of the element of heterogeneity and the nature of permeability of water along the element of heterogeneity.

*Keywords:* undrained array; sustainability; tunnel face; zone of heterogeneity; numerical analysis; finite element method.

## REFERENCES

1. Bulychev N. S.1989, *Mekhanika podzemnykh sooruzheniy v primerakh i zadachakh* [Mechanics of underground facilities in examples and questions]. Moscow, 270 p.
2. Protosenya A. G., Timofeev O. V. 2008, *Geomehanika* [Geomechanics]. Saint-Petersburg, 117 p.
3. Dashko R. E. 2011, Features of engineering-geological conditions of St. Petersburg. R.E. Dashko O. Yu. Alexandrova P. V. Kotyukov V. A. Shidlovskaya. *Razvitiye gorodov i geotekhnicheskoye stroitel'stvo* [Urban development and geotechnical construction], no. 1, pp. 1–47. (*In Russ*.)
4. Brinkgreve R. B. J., Kumarswamy S., Swolfs W. M., Foria F. 2017, PLAXIS 3D. User manual. Saint-Petersburg, 816 p.
5. Anagnostou G., Schuerch R., Ramoni M. 2014, TBM tunnelling in complex rock formations. Interventi e opere nelle formazioni complesse: XV MIR Conference. Torino, pp. 1–25.
6. Zingg S., Anagnostou G. 2018, Tunnel face stability and the effectiveness of advance drainage measures in water-bearing ground of non-uniform permeability. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, vol. 51, no. 1, pp. 187–202. https://doi.org/10.1007/s00603-017-1312-1
7. Vlasov S. N., Makovsky L. V., Merkin V. E. 2000, *Avariynyye situatsii pri stroitel'stve i ekspluatatsii transportnykh tonneley i metropolitenov [*Emergency situations in construction and operation of transport tunnels and subways]. 2nd ed., Moscow, 201 p.
8. Lykhin P. A. 2009, *Praktika tonnelestroyeniya v XX veke* [The practice of tunneling in the XX century], 327 p.
9. Bezrodny K, P., Lebedev M. O., Markov V. A., Starkov A. Yu. 2015, Geotechnical equipment in construction of a double-tracked main line tunnel with the help of TPMK. *Metro i tonneli* [Underground and Tunnels], no. 5, pp. 16–18. (*In Russ*.)
10. Cantieni L. 2011, Spatial effects in tunneling through squeezing ground. https://doi.org/10.3929/ethz-a-006397593
11. Alexeev A. V. 2018, Deformations of the forehead of the tunnel face in the area of structural-mechanical heterogeneity. *Gorny Informatsionno-Analiticheskiy Byulleten* [Mining Informational and Analytical Bulletin], no. 12, pp. 48–56. (*In Russ*.) https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-12-0-48-56
12. Vermeer P. A., Ruse N., Marcher T. 2002, Tunnel heading stability in drained ground. *Felsbau*, vol. 20, no. 6, pp. 8–18.
13. Broere W. 2003, Influence of excess pore pressures on the stability of the tunnel face. Proceedings of the ITA World Tunneling congress: (Re) Claiming the underground space, Amsterdam: Swets & Zeitlinger B. V., pp. 759–765.
14. Demenkov P. A., Trushko O. V., Potseshkovskaya I. V. 2018, Numerical experiments on the modeling of compensatory injection for the protection of buildings during tunneling. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 13, no. 23, pp. 9161–9169.
15. Karasev M. A. 2017, *Prognoz geomekhanicheskikh protsessov v sloistykh porodnykh massivakh pri stroitel'stve podzemnykh sooruzheniy slozhnoy prostranstvennoy konfiguratsii v usloviyakh plotnoy gorodskoy zastroyki* [The forecast of geomechanical processes in layered rocks during construction of underground structures of complex spatial configuration in the conditions of dense urban development]: PhD thesis, Saint-Petersburg, 307 p.
16. Wang W.D., Li Q., Xu Z.H. 2017, Determination of parameters for hardening soil small strain model of Shanghai clay and its application in deep excavations. Proceedings of the 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Seoul, pp. 2065–2068.

*The article was received on November 6, 2018*

* ✉ a1exeev@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0003-2581-4433
**pashaverbilo@mail.ru
https://orcid.org/0000-0001-6776-5866

УДК 502/504+523.6+552.6 https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-1-88-95

# Астероиды, кометы и метеориты – продукты взрыва планеты Фаэтон

**Стефан Григорьевич ПАНЯК***,
**Сергей Антонович ДЕГТЯРЕВ****

Уральский государственный горный университет, Россия, Екатеринбург

***Актуальность работы.*** Внедрение в астрономическую практику новейших приборов позволило увидеть большое количество так называемых «астероидов, сближающихся с Землей», которые реально представляют угрозу человечеству. Генетическая природа этих космических тел может быть установлена только при совокупном анализе астрономических и геологических данных.
***Цель работы:*** сопоставление новейших достижений астрономической науки в этой области с достижениями планетарной геологии и последующими генетическими построениями.
***Методология исследования.*** В работе проведен корректный анализ существующих в упомянутых разделах науки теорий, гипотез и предположений с использованием математического моделирования. На этом основании доказана, например, несостоятельность теории метеоритного происхождения Земли и некоторых других гипотез, возникающих как следствие одностороннего подхода астрономов и геологов к этому вопросу.
***Результаты.*** Совокупность астрономических и геологических данных свидетельствует о том, что астероиды, кометы и метеориты являются единым генетическим семейством, образованным вследствие взрыва планеты Фаэтон на месте современного пояса астероидов. Обломки экваториальных областей планеты (астероиды и метеориты) были выброшены в основном в плоскость эклиптики Солнечной системы и произвели «большую метеоритную бомбардировку» 3,9 млрд лет назад. Полярные «шапки» из замороженных газов планеты при этом улетели в перпендикулярной по отношению к эклиптике плоскости и образовали кометы. Причины взрыва увязываются с современной концепцией «гидридной модели» Земли В. Н. Ларина.
***Выводы***. Вещественный состав метеоритов, астероидов и комет не отличается от глубинных пород Земли. Они, таким образом, являются продуктом планетной эволюции, а не ее строительным материалом. Глобальные катаклизмы, которые фиксируются существенными сокращениями биоты Земли, по всей вероятности, не зависят от прохождения Солнечной системы через спирали нашей Галактики. Согласно современным астрономическим данным, Солнечная система находится между двух рукавов Галактики и вращается синхронно с ними. Человечество начинает осознавать актуальную необходимость подготовки к потенциальным космическим угрозам. Рассматриваются возможности взрыва астероидов и комет в момент подлета, коррекции их траектории, лазерного воздействия и др. Однако успеха в этих чрезвычайно сложных и трудоемких проектах можно добиться только при объединении усилий всего человеческого сообщества.

*Ключевые слова*: астероиды, метеориты, кометы, космические катастрофы, геохронологическая шкала, ранняя эволюция Земли.

## Введение

Настоящая статья представляет собой попытку интеграции современных научных достижений астрономии и геологии в области изучения малых космических тел, которые на протяжении нескольких миллиардов лет существенно влияли на эволюцию органической жизни нашей планеты. Они и сегодня представляют собой реальную космическую угрозу всему живому на Земле. Современные космические телескопы позволяют наблюдать на орбитах, близких к земной, несколько сотен астероидов, способных нанести Земле непоправимый ущерб.

Следует иметь в виду, что нестационарность Вселенной, доказанная в начале XX в. академиком А. А. Фридманом, свидетельствует о ее эволюции и сопровождается такими превращениями вещества и энергии, которые практически исключают возможность появления и существования привычного для нас живого вещества. Поэтому, на наш взгляд, появление живого вещества, включая человека, – явление уникальное. Редчайшее сочетание десятков параметров, необходимых для появления жизни, сконцентрировано именно на нашей (уникальной) планете. Сложение вероятностей множества параметров свидетельствует о том, что возможность существования живого, а тем более высокоорганизованного, вещества во Вселенной стремится к нулю. Этот уникальный, микроскопический шанс был реализован на нашей планете среди бесконечного множества иных звездных систем. Добавим, что эволюционный путь для превращения простейших организмов (прокариотов) в человека требует несколько миллиардов относительно спокойных лет, что еще на несколько порядков снижает вероятность существования разумных существ, способных создавать «внеземные цивилизации». Хотя при этом оптимистов-уфологов нельзя лишать возможности (на наш взгляд, безнадежной) поиска этих цивилизаций. Понимание уникальности человеческой цивилизации в окружающей нас Вселенной должно отрезвляюще действовать на некоторых авантюристов и политиков. Космические катастрофы, наряду с эндогенными (внутриземными) процессами, многократно уничтожали в прошлом почти все живое на нашей планете.

Следует отметить также то, что при изучении процессов в большом космосе (мегамире), как и на уровне микромира, математика как главный инструмент познания оперирует цифрами, приближающимися к нулю и бесконечности, что, на первый взгляд, может приводить к парадоксальным выводам, интерпретация которых доступна лишь специалистам. Иногда в таких случаях, когда тренд знаний выходит по асимптоте к нулю или бесконечности, т. е. в состояние полной неопределенности, употребляют расплывчатый термин «сингулярность». Важнейшими достижениями науки последних лет явились открытия неизвестной ранее «темной материи» и «отрицательной энергии» в астрофизике, а также материальной и диалектической сущности вакуума в физике квантовой, что подтвердило давнюю убежденность одного из авторов статьи в том, что мир, наша Вселенная, может существовать только как составная половинка бинарной, биполярной системы [1].

Природа астероидов, комет и метеоритов, и их угрозы для жизни человека должны рассматриваться в двух аспектах – астрономическом и геологическом. Астрономы в силу своей вооруженности приборами оперируют фактами и

* ✉ glzchs@mail.ru
https://orcid.org/0000-0001-8436-639X

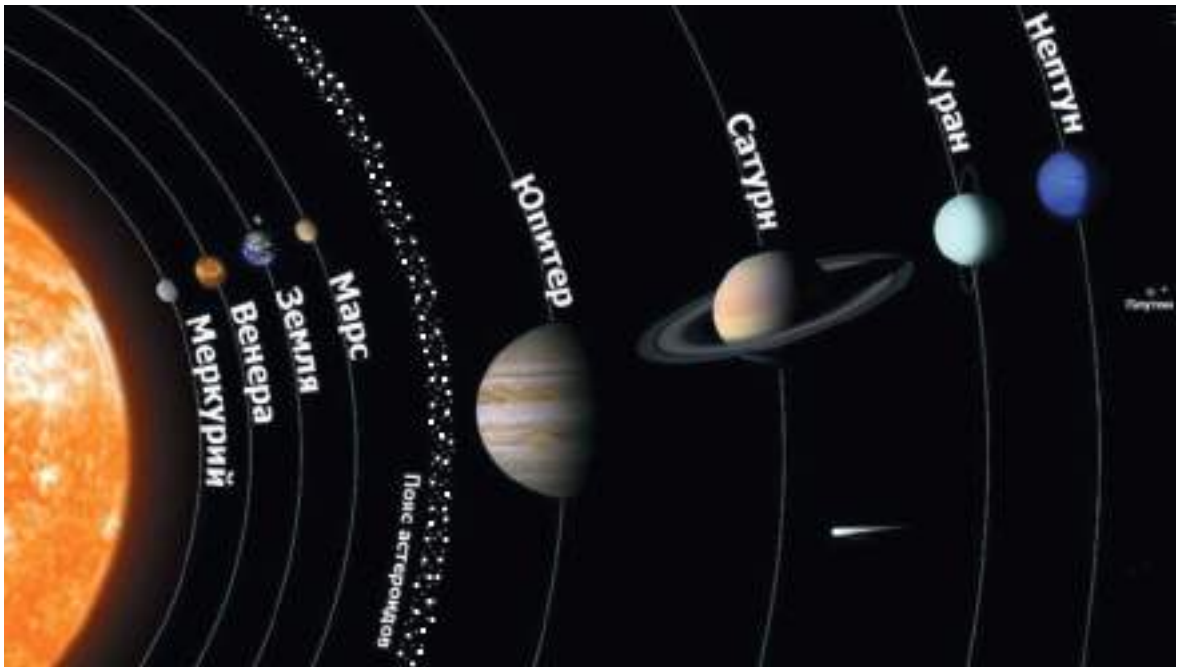



**Рисунок 1. Положение пояса астероидов в Солнечной системе (отмечено точками).**
**Figure 1. The position of the asteroid belt in the solar system (dotted).**

цифрами, геологи, обладая вещественным составом космических объектов, их возрастом и другими параметрами, рассуждают скорее с хронологических и генетических позиций.

## Астрономический аспект проблемы

**Астероиды** – относительно небольшие тела, имеющие гелиоцентрическую орбиту неправильной формы со следами множественных столкновений. В пределах Солнечной системы они обладают размерами до 1000 км. Большинство из них (> 90 %) вращаются в так называемом поясе астероидов между орбитами Марса и Юпитера, здесь же фиксируются наиболее крупные тела – Церера, Паллада, Веста и др. (рис. 1) Кстати, наиболее крупные объекты обладают шарообразной формой, что свидетельствует о наличии дополнительной внутренней энергии таких больших тел, позволяющей им приобретать форму шара благодаря гравитационной дифференциации вещества. Орбита пояса астероидов отвечает траектории отсутствующей планеты, которая должна здесь присутствовать согласно расчетам двух немецких астрономов – Тициуса и Боде.

Однако уже в конце XIX в. астроном Д. Вестон (США) впервые зафиксировал объект (астероид «Аэрта»), который двигался по необычной траектории вне пояса астероидов, внутри орбиты Марса. Сегодня их называют АСЗ (астероиды, сближающиеся с Землей). По мере совершенствования аппаратуры вскоре здесь были зафиксированы тела более мелких размеров, которые также двигались по нетрадиционной орбите. В настоящее время таких космических объектов установлено около 7 тысяч. Из них более 800 имеют размер более 1 км и способны создать на Земле в случае столкновения глобальную катастрофу [2].

Следует отметить, что распределение астероидов по размерам подчиняется логнормальному закону, когда увеличение размера тела на один порядок уменьшает их количество в геометрической прогрессии, и наоборот. Такая зависимость распределения размеров частиц при дроблении более крупного тела известна давно и получила математическую аргументацию [3]. Из таких «сближающихся с Землей» астероидов наибольшую реальную опасность сегодня представляет «Апофис», орбита которого приближается к земной через каждые 7 лет. В 2029 г. его траектория приблизится к земной до 38 000 км, что очень близко к так называемой геостационарной орбите, на которой вращаются основные промышленные спутники, обеспечивающие навигацию на нашей планете. Размер «Апофиса», напоминающего по форме гантель, около 350 м. В результате его падения образуется воронка, размером на один порядок больше, т. е. около 3.5 км, а масштабы разрушений сопоставимы с размерами небольшого государства. Считается, что город-миллионник может быть уничтожен космическим телом размером 60–80 м. Доказана его принадлежность к главному поясу астероидов [4].

Частота падений небесных тел (астероидов, метеоритов и комет) в хронологической координате также подчиняется логарифмическому закону: крупные тела, приводящие к региональным разрушениям, падают через 100 000 лет, а более мелкие через 10 000 лет и т. д. Их кратеры равномерно распределены по всей планете [5], а следы фиксируются повсеместно, исключая, естественно, моря и океаны, где они скрыты под поверхностью воды. Такие карты сегодня имеются в распоряжении специалистов (рис. 2). В рассматриваемом аспекте очень важно подчеркнуть, что *большинство кратеров, наблюдаемых на Луне, Марсе и других объектах, пространственно не перекрывают друг друга, что подтверждает мнение о единовременной «тяжелой, большой» бомбардировке Солнечной системы*. Это утверждение, по нашему мнению, лишний раз подтверждает массовое образование астероидов, метеоритов и комет при единовременном взрыве планеты Фаэтон. Последующие падения были случайными и единичными.

Глобальные вымирания определенных видов животных вызываются падениями астероидов размером от 10 км. Однако более детально на этом остановимся ниже, при рассмотрении геологического аспекта проблемы. Приведенные

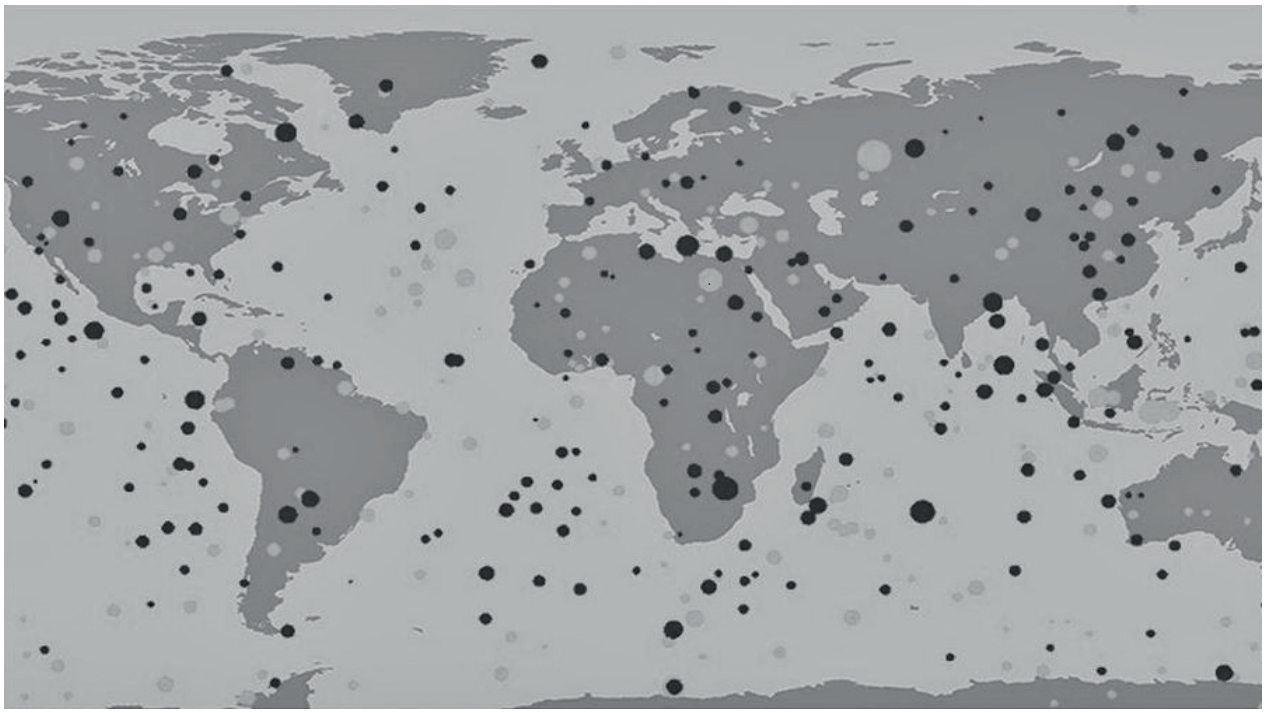


**Рисунок 2. Положение кратеров на поверхности Земли *(белым обозначено падение метеоритов днем (255), черным – ночью (301))*.**
**Figure 2. The position of craters on the Earth's surface (falling of meteorites in daytime is white-colored (255), black color – at night (301)).**

цифры ущерба могут существенно колебаться в зависимости от таких факторов, как плотность падающего тела, его химического и минерального состава, скорости полета, угла падения и др.

В астрономии выделяют три класса тел по химическому составу. К классу С относят углеродистые астероиды, которые доминируют по общему количеству (75 %), тела класса S – силикатные (17 %) и M – металлические (8 %). *Такое различие вещественного состава послужило для многих астрономов основной причиной отказа от принятой ранее гипотезы о том, что астероиды являются продуктами взрыва единого тела – планеты Фаэтон. Однако с позиций геологии такое разнообразие естественно и не критично. В случае взрыва нашей планеты, например, разнообразие состава ее обломков было бы в тысячу раз больше.* Всего в Солнечной системе насчитывают от 1 до 2 миллионов астероидов размером более 1 км. Более мелкие тела, включая метеориты, пока просто не поддаются учету. Четкая граница между астероидами и метеоритами не определена, однако самым тяжелым метеоритом считают упавший в Африке объект под названием Гоба, весивший около 60 т.

В конце раздела сделаем акцент на том, что астрономы пространственно разделяют астероиды на две группы, одна из них представлена телами пояса астероидов между орбитами Марса и Юпитера, а другая с более хаотичными орбитами расположена внутри орбиты Марса. Тела второй группы, естественно, представляют собой основную угрозу человечеству. Мы полагаем, что такое деление несколько искусственное, их генетическая природа, по нашему мнению, едина и рассмотрена далее.

**Кометы** – небольшие космические тела, движущиеся вокруг Солнца по очень вытянутым эллиптическим орбитам и сложенные, в отличие от астероидов и метеоритов, преимущественно замороженными газами. Размеры осей апогея и перигелия у них существенно различаются. В перигелии, с приближением к Солнцу, такие тела разделяются на ядро и длинный светящийся хвост (кому). Тепловые лучи Солнца приводят к сублимации вмороженных газов, которые отбрасываются на сотни тысяч километров в противоположную от звезды сторону. Здесь же попутно отметим очень важную деталь, которая понадобится в дальнейшем для расшифровки генетической природы описываемых космических тел. *Плоскости орбит комет, как правило, перпендикулярны орбитам метеоритов и астероидов.* Существует мнение, на наш взгляд, до некоторой степени ошибочное, о том, что астероиды являются бывшими кометами, потерявшими со временем свою газовую оболочку. Согласно нашей концепции, большинство комет образовалось за счет полярных «шапок» планеты Фаэтон с мощным слоем вмороженных газов, смешанных с рыхлыми поверхностными образованиями. Именно поэтому ядра комет нередко представляют собой рыхлые продукты (реголит). А доля астероидов, которые могли быть ранее кометами, согласно последним расчетам, снижена до 5–10 % [6].

За последние десятилетия кометы достаточно хорошо изучены, космические аппараты («Джотто», «Вега-1», «Вега-2» и др.) многократно проникали в хвост комет и даже садились на поверхность. Эти исследования не принесли сенсаций, в коме обнаружили все те же известные на Земле соединения воды, углекислоты, метана и других химических соединений. Твердые компоненты комет представлены мелкими частицами известных на Земле минералов и пород. Размеры ядер изученных и занесенных в специальные реестры комет колеблются, как правило, в пределах первых километров. Хвосты по мере испарения вещества сравнительно быстро могут уменьшаться в размерах, что наблюдалось в период недавнего приближения давно известной кометы Галлея, когда ее уже нельзя было увидеть невооруженным глазом. В 1994 г. ученым удалось наблюдать падение кометы Шумейкера–Леви на Юпитер, который своей мощной гравитацией нередко отвлекает на себя пролетающие космические объекты, спасая тем самым человечество. Иногда в на-

учно-популярных фильмах проскальзывают «сенсации», обусловленные некомпетентностью специалистов. В одном из них, например, типичную для земных недр тектоническую брекчию в метеорите трактуют как продукт «склеивания» обломков после их столкновения в космосе, что является явным абсурдом.

На сегодняшний день в реестр занесено более 400 комет, которые несколько условно разделены на коротко- и длиннопериодические. Границей между ними служат 200 лет. Упомянутая комета Галлея обращается вокруг Солнца с периодом 76 лет, а у кометы Энке он составляет лишь несколько лет. Скорость движения комет аналогично астероидам составляет первые десятки километров за секунду. При увеличении скорости движения возрастает центробежная сила, что, естественно, увеличивает период обращения тела.

Хорошо известная в России катастрофа на р. Тунгуске в 1908 г., по всей вероятности, была вызвана падением кометы, однако дискуссии по этому поводу не закончены, поэтому сейчас ее называют ТКТ (Тунгусская космическая катастрофа). Основным аргументом в пользу кометы является отсутствие на месте падения кратера и твердых обломков. Однако огромные разрушения на площади более 2000 км$^2$ свидетельствуют о потенциальных опасностях падающих комет.

**Метеориты** – небольшие небесные тела, в изобилии падающие на Землю. Собственно, метеоритами называют лишь тех пришельцев из космоса, которые прорвались сквозь атмосферу и упали на Землю. Их предшественников, парящих в космосе, называют метеорами. Иногда между ними могут быть некоторые различия. Не сгоревшие в атмосфере метеориты являются тугоплавкими остатками метеоров. Полагают, что на нашу планету ежегодно падает около 2000 т метеоритного вещества. Они сравнительно хорошо изучены и разделены на каменные (хондриты – 85 % и ахондриты – 7 %), железные (сплав железа с никелем – 6 %) и железокаменные (около 2 %). *В состав всех перечисленных разновидностей входят известные для земных пород минералы, формирующиеся в глубоких недрах нашей планеты*. Этот момент следует также подчеркнуть особо для астрономов, ибо эта деталь влияет на последующие генетические построения.

Соотношение упомянутых разновидностей метеоритов в свое время было замечено академиком А. П. Виноградовым, который провел известный эксперимент «зонной плавки» [7]. После расплавления упомянутой смеси метеоритного вещества академик получил в тигле разрез, который идентифицировался с разрезом Земли. Каменные метеориты были сопоставлены с земной корой и мантией, а железные с ядром Земли, что, по всей вероятности, абсолютно правомочно. Однако впоследствии А. П. Виноградов совместно со своим учеником профессором А. А. Ярошевским пришли к ошибочному, на наш взгляд, выводу о том, что наша планета формировалась из метеоритов, что категорически отвергается математическими расчетами [8]. *Метеориты, по нашему глубокому убеждению, являются продуктами планетной эволюции, а не ее строительным материалом*. Среди сторонников исходного метеоритного состава Земли никто пока внятно не аргументировал механизм формирования алмаза или его спутника пиропа в среде космического вакуума.

Представляют ли метеориты угрозу человечеству? Отрицать такую возможность, наверное, нельзя, однако уже в процессе классификации падающих космических тел специалисты непроизвольно выделили (по размеру) их в класс малоопасных. Хотя упавшее в пустынной области на юге Африки тело весом более 60 т (упомянутый ранее метеорит Гоба) в селитебной зоне могло бы нанести колоссальный ущерб. Известен только один смертельный случай в Индии. Вместе с тем, по нашему мнению, нельзя рассматривать отдельно метеориты, астероиды и кометы, которые являются единым генетическим семейством.

## Геологический аспект проблемы

Геология обладает некими важными инструментами изучения космических опасностей. В ее распоряжении методы относительной (палеонтологический, стратиграфический) и абсолютной (уран-свинцовый, рубидий-стронциевый, неодим-самариевый, калий-аргоновый, углерод-углеродный) геохронологии. Более ста лет существует и уточняется геохронологическая шкала, отражающая глобальные и региональные катастрофы на Земле.

Древнейшие рубежи истории нашей планеты на стадии ее становления отмечены в более ранних публикациях авторов. *Здесь очень важно отметить фиксируемое большинством ученых, изучающих раннюю историю Земли, событие, вызванное единовременной большой и массовой бомбардировкой Солнечной системы, которое датируется временем 3,9 млрд лет.* Ибо, по нашему мнению, именно в это время произошел взрыв планеты Фаэтон, которая, согласно упомянутым ранее расчетам, должна была располагаться между траекториями Марса и Юпитера. Следует отметить, что о таком взрыве впервые писал еще в 1804 г. немецкий астроном Вильгельм Ольберс. В последующем эта гипотеза существовала с переменным успехом. Однако поступающие данные позволяют возродить ее в новом качестве. Новых аргументов множество. Возраст упавших на Землю метеоритов укладывается в промежуток от времени формирования планет Солнечной системы (4,6–4,5 млрд лет) до «большой массовой бомбардировки» (3,9 млрд лет). В соответствии с законами взрыва наиболее мелкие обломки (метеориты) улетели на наибольшее расстояние, а крупные астероиды сохранили свое положение в пределах более ранней орбиты. Различие вещественного состава космических тел, как было отмечено, не является существенным аргументом гетерогенности их генезиса.

Предполагаемая планета находилась на критическом расстоянии между каменными и газовыми планетами и по внешнему виду должна была напоминать скорее Марс, но с более развитыми белоснежными шапками вмороженных газов на полюсах. В случае взрыва такой планеты ее оголенные ото льда экваториальные части должны были разлетаться, естественно, в плоскости эклиптики перпендикулярно оси вращения планеты и произвести массовую бомбардировку завершающих свое формирование планет, включая Землю и расположенную значительно ближе, чем сейчас, Луну. В свою очередь, огромные полярные шапки при взрыве должны улетать по направлению оси вращения, т. е. перпендикулярно плоскости эклиптики. Именно такие орбиты фиксируются сегодня для большинства комет, которых, таким образом, нет необходимости «вытаскивать» из бесконечно удаленного облака Орта или пояса Койпера, расположенных на границе Солнечной системы. Возможность захвата комет из облака Орта описана в работе Е. Е. Бирюкова [9].

Выброс полярных «шапок» перпендикулярно плоскости эклиптики обусловил и значительно более вытянутую орбиту, и больший период обращения. Очень важным подтверждением генетического единства астероидов, по нашему

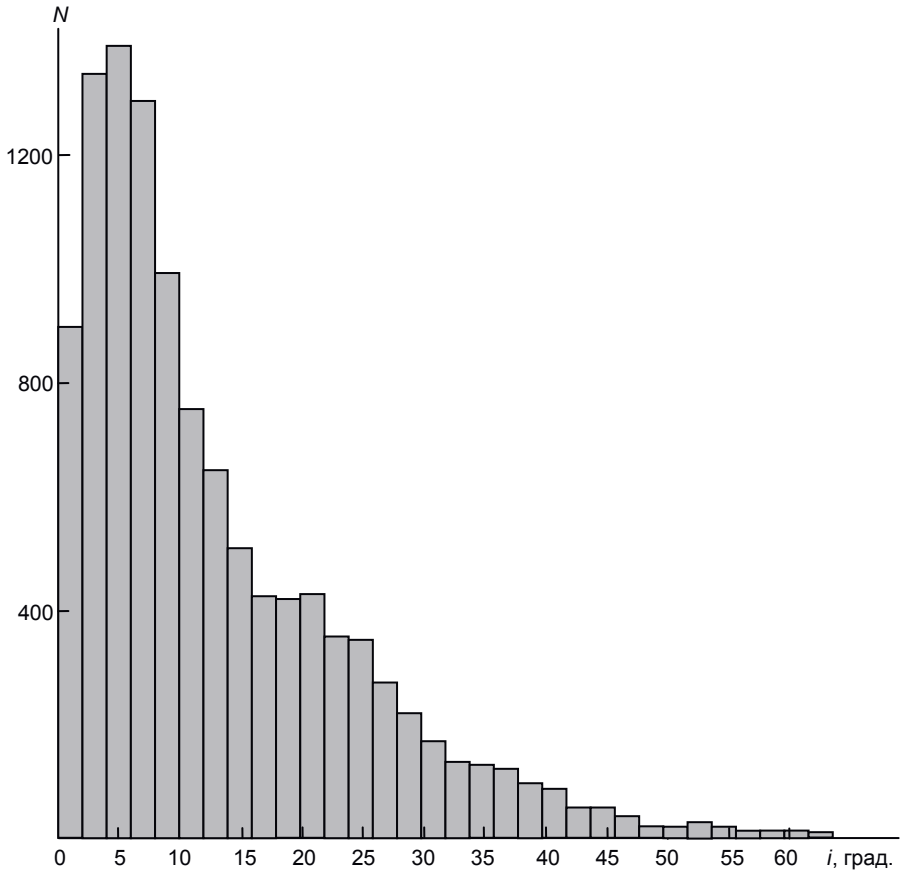



**Рисунок 3. Распределение астероидов по наклону к плоскости эклиптики.**
**Figure 3. The distribution of asteroids in inclination to the ecliptic plane.**

мнению, является их эксцентриситет, наклонение к плоскости эклиптики. *Такие углы наклона (рис. 3) по распределению строго соответствуют логнормальному закону, а кривая распределения является унимодальной и регулярной [2]. В случае гетерогенного генезиса астероидов кривая была бы полимодальной и нерегулярной.* Отметим параллельно, что мы не исключаем появления «блуждающих» космических тел, пересекающих орбиту Земли.

Система Земля–Луна находилась тогда в стадии остывания после более раннего расплавления их внешних оболочек [8] (рис. 4). Разогрев оболочек до температур плавления, в интервале 4,6–4,5 млрд лет был обусловлен гравитационным взаимодействием близко расположенных Земли и ее спутника. Именно тогда были образованы на Земле и Луне уникальные породы – анортозиты, которые до сих пор слагают светлые области нашего спутника. Их абсолютный возраст надежно обоснован и составляет 4,6–4,5 млрд лет. В условиях исключительно медленного остывания основной (базальтовой) магмы в ней успел произойти раздел двух разных по плотности минералов: пироксена и плагиоклаза. Более легкий плагиоклаз (анортит) сформировал верхнюю анортозитовую оболочку обеих планет. Последующее глобальное событие на Земле и Луне четко коррелируется со временем «большой (тяжелой) метеоритной бомбардировки» (3,9 млрд лет), вследствие которой первичная анортозитовая кора обеих планет подверглась массовому кратерированию. Были сформированы множественные вулканы, которые образовали обширные темные базальтовые «моря», возраст которых четко увязывается со взрывом планеты Фаэтон.

О неизбежности взрыва Фаэтона, располагавшегося на границе каменных и газовых планет, свидетельствуют новые достижения петрологии. Известна определенная закономерность расположения планет: каменные аналоги расположены в близких окрестностях Солнца, а газовые гиганты на периферии. По мере удаления от звезды в планетах увеличивается количество легких химических элементов, в частности главного из них – водорода, в меньшей степени углерода. Большие содержания водорода в недрах Земли и ее ядре сегодня признается большинством ученых. Еще в 1970-е гг. вышла книга «Гипотеза изначально гидридной Земли» профессора В. Н. Ларина, которая позволила обосновать механизм возможного расширения нашей планеты Земля [10]. Одна из современных геотектонических гипотез предполагает пульсирующее развитие Земли [11]. Само распределение каменных и газовых планет по удалению от Солнца В. Н. Ларин объясняет зависимостью распределения элементов в Солнечной системе от их потенциалов ионизации. Автор впервые доказал также текучесть металлов при наличии примесей водорода в условиях высоких давлений, обосновал наличие в ядре планеты гидридов металлов. Гипотеза подвергается критике, однако факты наличия глубинных водородных струй, поставляющих этот элемент в месторождения углеводородов, отвергать невозможно.

С преобразованиями тяжелых углеводородов в более легкие разновидности в процессе их подъема связывают детонационные эффекты, которые являются причинами глубокофокусных землетрясений [12, 13]. При наличии твердых оболочек такие насыщенные водородом планеты имеют возможности для расширения и потенциального взрыва. Перенасыщенные водородом и существенно газовые планеты типа Юпитера могут избежать эксплозии путем расширения с одновременным уменьшением удельной плотности до 1 г/см$^3$ и ниже.

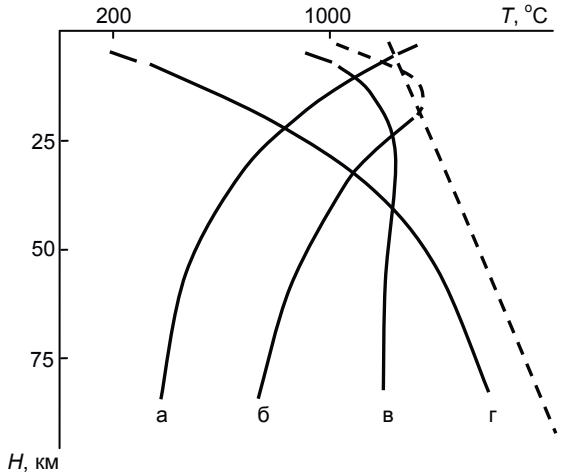



**Рисунок 4. Эволюция раннедокембрийских геотерм, млрд лет.** а – 4,6; б – 4,2; в – 3,6; г – 2,6; штриховая линия – плавление базальтовой эвтектики.

**Figure 4. Evolution of early Precambrian geotherms, billion years.** a – 4.6; b – 4.2; c – 3.6; e – 2.6; a dashed line is melting of basalt eutectics.

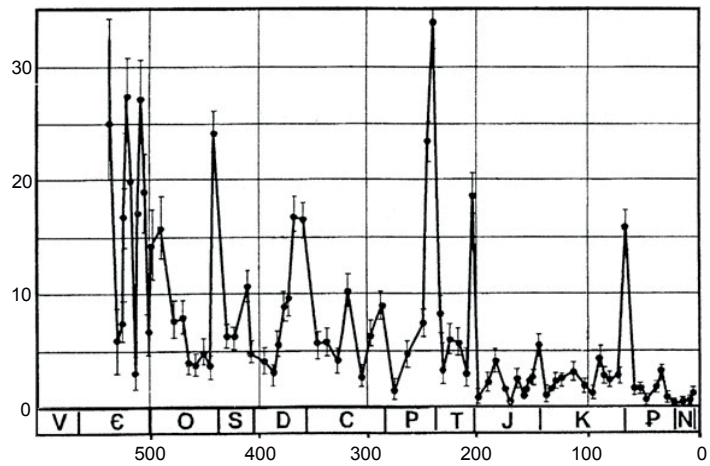



**Рисунок 5. Масштабы вымирания биоты в палеозойское время по данным [15].**

**Figure 5. The scale of biota extinction during the Paleozoic stage according to [15].**

Ранее мы неоднократно обращались к вопросу о возможности формирования планет за счет метеоритов, на чем настаивают некоторые авторы-прагматики, наблюдающие этот процесс воочию. Физико-математические расчеты категорически отвергают эту возможность [8]. По нашим данным, формирование планет происходило в процессе аккреции существенно водородного газового облака с удельным весом частиц около $10^{-23}$ г, что отвечает так называемому «космическому соотношению». Эти данные хорошо согласуются с приведенными ранее аргументами В. Н. Ларина. А метеориты, как и астероиды, являются продуктами планетной эволюции и были сформированы в глубоких недрах. Об этом свидетельствуют минералы (оливин, пироксен, иногда алмаз), которые являются индикаторами больших глубин формирования. Абсолютной фантазией кажутся некоторые представления о возможности синтеза таких минералов в условиях космического вакуума.

Более поздние, а значит, более обоснованные рубежи истории Земли фиксируются для палеозоя, мезозоя и кайнозоя, которые в геохронологической шкале датируются эрами. Они подразделяются на периоды (кембрий, ордовик, силур и т. д.). Последние состоят из эпох, которые, в свою очередь, подразделяются на века. Все интервалы отмеченных подразделений базируются на палеонтологическом материале. Продолжительность палеозойской эры составляет около 290 млн лет, мезозойской – около 190 млн лет, а начало современной кайнозойской датируется 65 млн лет. В интервале упомянутых цифр 190–290 млн лет нередко называют продолжительность галактического года, время одного оборота нашей Галактики. Продолжительность отдельных периодов в рамках упомянутых эпох составляет от 40 до 60 млн лет (рис. 5).

Имеются публикации, увязывающие длительность периодов с прохождением нашей Солнечной системы через шесть рукавов галактики «Млечный путь» [14]. Если некую усредненную цифру продолжительности галактического года разделить на шесть, получим 240 : 6 = 40 млн лет. Автор публикации полагает, что катастрофические события на нашей планете происходят тогда, когда Земля в составе Солнечной системы проходит через один из рукавов галактики, насыщенный обломками комет и астероидов. Публикация заслуживает внимания как одна из гипотез, однако к ней могут быть предъявлены серьезные возражения. По всей вероятности, Солнечная система вращается вместе с рукавами, а не двигается автономно в относительно неподвижной галактике, что исключает пересечение этих спиралей. Сейчас она расположена между рукавами Стрельца и Персея. А далее цитата по тексту сайта «Wonderful Planet», раздел «Астрономия»: «*Единственное место, где скорости звёзд и спиральных рукавов совпадают — это так называемый коротационный круг, и именно на нём расположено Солнце. Для Земли это обстоятельство чрезвычайно важно, поскольку в спиральных рукавах происходят бурные процессы, образующие мощное излучение, губительное для всего живого. И никакая атмосфера не смогла бы от него защитить. Но наша планета существует в* сравнительно спокойном месте Галактики и в течение сотен миллионов (или даже *миллиардов) лет не подвергалась воздействию этих космических катаклизмов. Возможно, именно поэтому на Земле смогла зародиться и сохраниться жизнь*». Добавим только, что в рукавах сконцентрированы, прежде всего, звезды и газы с исключительно малой плотностью (возможно также загадочное невидимое вещество – темная материя). Наличие там астероидов и комет весьма проблематично, и вряд ли может быть доказано в ближайшие годы.

Для более мелких подразделений геохронологической шкалы (эпохи и века) не отмечается какой-либо строгой цикличности. Изменения биоты в пределах века, например, фиксируются широким интервалом в пределах нескольких миллионов лет. Когнитивная революция, приведшая к формированию современного человека, произошла 1,5–2,0 млн лет назад. По всей вероятности, строгой цикличности геохронологической шкалы ожидать не приходится по многим причинам. Одна из них, например, кроется в том, что изменение биоты может быть обусловлено как внешними (космическими), так и внутриземными причинами (извержениями супервулканов, инверсиями магнитного поля и др.).

## Выводы

Подводя итоги научных исследований многочисленных ученых в области космических опасностей, нельзя не обратить внимание на материальное единство окружающего нас мира. Экзотические или сенсационные находки возникают

из-под пера журналистов или уфологов-фантастов. Близость физических и химических характеристик космических пришельцев к их земным аналогам свидетельствует о том, что они являются продуктом взрыва одной из планет каменной группы, и нет необходимости предполагать их привнос из пределов дальнего космоса. Как уже отмечалось выше, по мере отдаления от Солнца существует некая специфика химического состава вещества. Поэтому в случае привноса комет из удаленных граничных пределов Солнечной системы (колец Оорта) такая специфика могла бы быть обнаружена. Близость возрастов образования, сходство химических составов, пространственная близость к поясу астероидов и некоторые другие отмеченные ранее аргументы однозначно, на наш взгляд, свидетельствуют о генетическом единстве астероидов, комет и метеоритов, образованных при взрыве отсутствующей планеты Фаэтон.

Большинство тел пояса астероидов сегодня сохраняют свое относительно стабильное положение на своей первичной орбите и особой угрозы не представляют. Более мелкие обломки, улетевшие к периферии Солнечной системы, по всей вероятности, были захвачены мощным гравитационными полями Юпитера и Сатурна. Обломки, улетевшие в противоположную сторону, меняли свои траектории под влиянием более слабых гравитационных полей Марса, Земли, Венеры, Меркурия. Два достаточно больших обломка (Деймос и Фобос) стали спутниками ближайшего гравитационного источника – планеты Марс. Значительная часть из них падала на планеты и оставила следы в виде многочисленных кратеров. В отличие, например, от Луны или Меркурия Земля, благодаря своей геологической активности, затушевывает свою древнюю кратерированность. В начале сентября 2018 г. недалеко от Земли пролетели два астероида, множество находится на подлете. Это реальные факты, которые фиксируются воочию. А ведь планета расположена не внутри одного из рукавов Галактики с мифическими кометами, которых никто не сможет обнаружить даже в отдаленном будущем. Можно искать космические угрозы за пределами нашей звездной системы, включая спиральные рукава Галактики, однако нельзя при этом игнорировать реальный пояс астероидов, который фактически достигает орбиты нашей планеты.

В упомянутых масштабах времени и процессов, протекающих на Земле и в космосе, человеческая жизнь только мгновение. Поэтому за свою жизнь человек может, нередко, не наблюдать ни одной глобальной катастрофы. Хотя сегодня, в эпоху переполненного информационного пространства, подобное утверждение уходит в прошлое. Человечество начинает осознавать актуальную необходимость подготовки к потенциальным космическим угрозам. Рассматриваются возможности взрыва астероидов и комет в момент подлета, коррекции их траектории, лазерного воздействия и др. Однако успеха в этих чрезвычайно сложных и трудоемких проектах можно добиться только при объединении усилий всего человеческого сообщества.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Паняк С. Г. Математические парадоксы как технология создания мира // 21-й век: фундаментальная наука и технологии (North Charleston, USA, 24–25 апр. 2017 г.). 2017. Т. 1. С. 69–71.
2. Галушина Т. Ю. Популяция астероидов, сближающихся с Землей // Вестник СибГАУ. 2014. № 4 (56). С. 33–40.
3. Разумовский Н. К. Логарифмически нормальный закон распределения вещества и его свойства // Записки ЛГИ. 1948. Т. XX. С. 105–121.
4. Liang-Liang Yu., Jianghui Ji., Wing-Huen Ip. Surface thermophysical properties on the potentially hazardous asteroid (99942) Apophis // Research in Astronomy and Astrophysics. 2017. Vol. 17, № 7. https://doi.org/10.1088/1674-4527/17/7/70
5. Billings L., Carlowicz M., Agle D. C. Mapping Fireballs // A catalog of NASA images and animations of our home Planet, NASA, USA. URL: https://visibleearth.nasa.gov/view.php?id=84763
6. Лупишко Д. Ф., Емельяненко В. В., Бирюков Е. Е. Динамическая и физическая эволюция комет: доля астероидов, сближающихся с Землей, кометного происхождения // Вестник ЮУрГУ. 2007. № 19. С. 78–81.
7. Виноградов А. П., Ярошевский А. А., О физических условиях зонного плавления в оболочках Земли // Геохимия. 1965. № 7. С. 75–84.
8. Паняк С. Г. Формирование Земли: геолого-астрономический аспект // Изв. УГГУ. 2000. № 10. С. 7–11.
9. Бирюков Е. Е. Захват комет из облака Орта на орбиты галлеевского типа и орбиты семейства Юпитера // Астрономический вестник. 2007. Т. 41, № 3. С. 232–240.
10. Ларин В. Н. Гипотеза изначально гидридной Земли (новая глобальная концепция). М.: Недра, 1975. 101 с.
11. Милановский Е. Е. Пульсации и расширение Земли – возможный ключ к пониманию ее тектонического развития и вулканизма в фанерозое // Природа. 1978. № 7. С. 22–35.
12. Карпов И. К., Зубков В. С., Бычинский В. А. и др. Детонация в мантийных потоках тяжелых углеводородов // Геология и геофизика. 1998. Т. 39, № 6. С. 754–762.
13. Маракушев А. А., Соколов Б. А. Углеводород на Земле и в космосе и проблема происхождения жизни // Вестник Москов. ун-та. Сер. «Геология». 2001. № 3. С. 3–15.
14. Баренбаум А. А. О происхождении новейших поднятий земной коры: новая постановка проблем глобальной геодинамики // Уральский геологический журнал. 2012. № 6. С. 3–27.
15. Sepkoski J. J. (Jr.) Patterns of Phanerozoic extinction: A perspective from global data bases. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 1995. P. 35–52. https://doi.org/10.1007/978-3-642-79634-0_4

*Статья поступила в редакцию 31 октября 2018 г.*

УДК 502/504+523.6+552.6 https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-1-88-95

# Asteroids, comets and meteorites – products of the explosion of the Phaethon planet

**Stefan Grigor'evich PANYAK***,
**Sergey Antonovich DEGTYAREV****

Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia

***Relevance of the work.*** The introduction of new tools into astronomical practice allowed us to see several the so-called "asteroids approaching the Earth", which actually pose a threat to humanity. The genetic nature of these cosmic bodies can be determined only by cumulative analysis of astronomical and geological data.
***Purpose of the work:*** comparison of the latest achievements of astronomical science in this area with the advances of planetary geology and subsequent genetic configurations.
***Research methodology.*** In this paper, the correct analysis of theories, hypotheses and assumptions existing in the mentioned subdisciplines using mathematical modeling was carried out. On this basis, for example, inconsistency of the theory of the meteoritic origin of the Earth was proved, as well as some other hypotheses as a result of a heavy-handed approach of astronomers and geologists to this issue.
***Results.*** The combination of astronomical and geological data suggests that asteroids, comets and meteorites are a single genetic family formed as a result of the explosion of the Phaethon planet at the site of the present asteroid belt. The debris of the equatorial regions of the planet (asteroids and meteorites) were thrown mainly into the ecliptic plane of the solar system and produced the "Late Heavy Bombardment" 3.9 billion years ago. At the same time, the polar "caps" of the frozen gases of the planet flew away in a plane perpendicular to the ecliptic plane and formed comets. The causes of the explosion are linked to the modern concept of the "hydride" Earth model by V. N. Larin.
***Conclusions*** The material composition of meteorites, asteroids and comets does not differ from the deep-seated rocks of the Earth. Thus, they are a product of planetary evolution, and not the planet's industrial mineral. In all likelihood, global perturbations that are fixed by significant reductions in the biota of the Earth do not depend on the movement of the Solar system through the spirals of our Galaxy. According to modern astronomical data, the Solar System is located between two Perseus arms and rotates synchronously with them. Humanity begin to realize the urgent need to prepare for potential space threats. The possibilities of the explosion of asteroids and comets at the moment of approach, the correction of their trajectory, laser exposure, etc. are considered. However, success in these extremely complicated and time-consuming projects can only be achieved by combining the efforts of the entire human community.

*Keywords*: asteroids, meteorites, comets, space disaster, geochronological scale, the early evolution of the Earth.

## REFERENCES

1. Panyak S. G. 2017, *Matematicheskiye paradoksy kak tekhnologiya sozdaniya mira* [Mathematical paradoxes as a technology to create the world]. 21st century: fundamental science and technology (North Charleston, USA, April 24–25, 2017), vol. 1. pp. 69–71.
2. Galushina T. Yu. 2014, Asteroid population approaching the Earth. *Vestnik SibGAU* [Siberian Journal of Science and Technology], no. 4 (56), pp. 33–40. (*In Russ.*)
3. Razumovsky N. K. 1948, Logarithmically normal distribution law of a substance and its properties. *Zapiski Leningradskogo gornogo instituta* [Proceedings of the Leningrad Mining Institute], vol. XX, pp. 105–121. (*In Russ.)*
4. Liang-Liang Yu., Jianghui Ji., Wing-Huen Ip. 2017, Surface thermophysical properties on the potentially hazardous asteroid (99942) *Apophis. Research in Astronomy and Astrophysics*, vol. 17, no. 7. https://doi.org/10.1088/1674-4527/17/7/70
5. Billings L., Carlowicz M., Agle D. C. Mapping Fireballs. A catalog of NASA images and animations of our home Planet, NASA, USA. URL: https://visibleearth.nasa.gov/view.php?id=84763
6. Lupishko D. F., Emelyanenko V. V., Biryukov E. E. 2007, Dynamic and physical evolution of comets: the share of asteroids of cometary origin which are approaching the Earth. *Vestnik YUUrGU* [Bulletin of the South Ural State University], no. 19, pp. 78–81. (*In Russ.*)
7. Vinogradov A. P., Yaroshevsky A. A., 1965, About the physical conditions of zone melting in the Earth's Spheres. *Geokhimiya* [Geochemistry], no. 7, pp. 75–84. (*In Russ.*)
8. Panyak S. G. 2000, Earth Formation: geological and astronomical aspect. *Izvestiya UGGU* [News of the Ural State Mining University], no. 10, pp. 7–11. (*In Russ.)*
9. Biryukov E. E. 2007, Capture of comets from the Oort cloud to the orbits of the Galilean type and the orbits of Jupiter's family. *Astronomicheskiy vestnik* [Astronomical Journal], vol. 41, no. 3, pp. 232–240. (*In Russ.*)
10. Larin V. N. 1975, *Gipoteza iznachal'no gidridnoy Zemli (novaya global'naya kontseptsiya*) [The Hypothesis of the Initial Hydride Earth (New Global Concept)]. Moscow, 101 p.
11. Milanovsky E. E. 1978, Pulsations and expansion of the Earth is a possible key to understanding its tectonic development and volcanism in the Phanerozoic. *Priroda* [Nature], no. 7, pp. 22–35. (*In Russ.*)
12. Karpov I. K., Zubkov V. S., Bychinsky V. A. et al. 1998, Detonation in the mantle flows of heavy hydrocarbons. *Geologiya i geofizika* [Geology and Geophysics], vol. 39, no. 6, pp. 754–762. (*In Russ.*)
13. Marakushev A. A., Sokolov B. A. 2001, Hydrocarbon on Earth and in space and the problem of the origin of life. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Geologiya* [MSU Vestnik. Geology], no. 3, pp. 3–15. (*In Russ.)*
14. Barenbaum A. A. 2012, About the origin of the newest uplifts of the earth's crust: new formulation of the problems of global geodynamics. *Ural'skiy geologicheskiy zhurnal* [Uralian Geological Journal], no. 6, pp. 3–27. (*In Russ.*)
15. Sepkoski J. J. (Jr.) 1995, Patterns of Phanerozoic extinction: A perspective from global data bases. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, pp. 35–52. https://doi.org/10.1007/978-3-642-79634-0_4

*The article was received on October 31, 2018*

* ✉ glzchs@mail.ru
https://orcid.org/0000-0001-8436-639X

# Технические науки
# Engineering sciences

УДК 624.042.12 https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-1-96-102

## Results of studies for the modernized equipment of a pipelayer

**Pavel Aleksandrovich KORCHAGIN***,
**Anton Borisovich LETOPOLSKIY****,
**Irina Alekseevna TETERINA*****

Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), Omsk, Russia

***Relevance and purpose of the work.*** Vertical and horizontal swings of a pipeline leading to an uneven distribution of its mass and, as a result, the loss of stability of a crane-pipelayer itself is a problem of modern engineering, which has no unambiguous solution today. This paper gives an option of improving the design of an additional support for a pipe-layer's boom. The proposed solution allows to increase evenness of laying a pipe and increase the stability of the pipelayer in its operating mode. The result can be achieved by using some additional elements to the design of the pipe-layer's boom support.
***Methods.*** The strength calculation of the proposed design using the existing method is quite time-consuming. To determine the critical stresses, strain values and maximum displacements in the design, the Solid Works software was used.
***Results and their discussion.*** The proposed design involves connecting a support with a cargo boom. The support consist of a hydraulic cylinder and a metal base used to fasten a cylinder to the support by means of a bearing type-connection. To confirm the performance of the proposed technical solution, the dependencies are presented, which are based on the design scheme of the pipelayer working equipment. Calculated dependencies allow determining the amount of load for the pipelayer.
***Conclusions.*** The results of theoretical studies conducted in the Solid Works software product are presented graphically and show stresses, displacements and deformations in the boom design of the machine for laying the main pipeline. Additionally, as a result of research, the value of the safety factor in the design of the pipelayer boom support has been determined. The diagrams of equivalent stresses, strain values, safety factor and possible displacements in the design of the modernized equipment enable us to draw a conclusion on the performance of the proposed design of the pipelayer boom.

*Keywords*: pipelayer, pipeline construction, road-building machines, major pipeline, pipelayer boom, work equipment.

### Introduction

A pipelayer is a road construction machine used in the construction and repair of pipelines (*GOST P 52079–2003. Wrought iron pipe for major gas pipelines, oil pipelines, and product pipelines. Enacted 2002–01–01. Moscow, 2005. 32 p.*)[1]. The pipelayer is a crane with a side boom. The ability to lift the same load by the pipelayer at different boom inclinations is not constant. According to its main purpose, the pipelayer is subjected mainly to external vertical loads applied to its load hook; these loads include a weight of a single-part rigid cargo or the weight of a raised elastic section of the laid pipeline [2]. The second variant of the external load is complex since it depends not only on the elevated pipeline but on the shape of its deflection as well [2].

The movement of the pipelayer along the roughs (as well as inconsistent actions of operators during group work of machines with a common load) leads to the fact that the shape of the pipeline deflection in the vertical plane constantly changes; the mass of the raised section between the machines is redistributed [3]. In other words, if during work with a single-part rigid cargo, the load on the working equipment is constant and depends only on the weight of this load and while working with a pipeline it is variable, as it depends on many constantly changing technological factors and, above all, on a transitory weight (pipeline parameters) (Fig. 1) [2].

In order to ensure the safety of work for laying the pipeline, it is proposed to improve the design of equipment.

### Purpose of the research

When working, the load on the work equipment often does not correspond to the load capacity of a machine. In this case, there is a danger of tipping over of the pipelayer [1]. One of the solutions to this problem is to install a support which is mounted on the main pipelayer boom (Fig. 2) [3].

### Materials and methods of the research

The crane with a side boom (pipelayer) has the ability to lift the same load in a number of options for the boom lifting is not constant. In the position of the boom close to the vertical, the pipelayer is able to lift a load of greater weight than with an increase of working radius, due to the possible tipping of the machine towards the load [2].

To determine the hook load of the pipelayer, the following calculation was made [4]:

1. Trench parameters;
2. Minimum number of pipelayers when performing a working operation.

Trench height ($h_{tr}$)

$$h_{tr} = 0{,}8 + D_{tr},$$

where $D_{tr}$ is the diameter of the pipeline.

*korchagin_pa@mail.ru
https://orcid.org/0000-0001-8936-5679
**Antoooon-85@mail.ru
https://orcid.org/0000-0003-3503-131X
*** iateterina@mail.ru
https://orcid.org/0000-0001-8012-8511

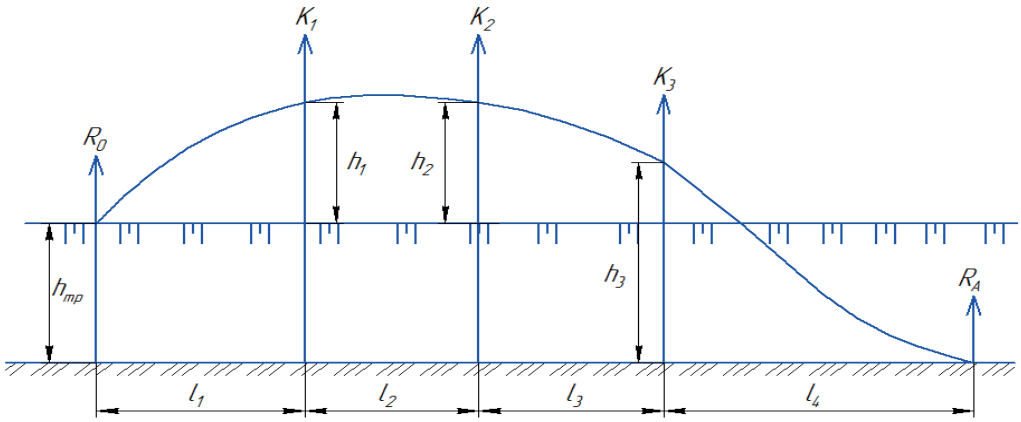



**Figure 1. Technological scheme of pipeline construction.**
**Рисунок 1. Расчетно-технологическая схема укладки трубопровода.**

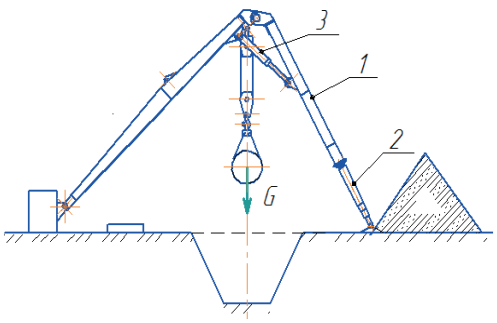



**Figure 2. Pipelayer boom equipped with support.** 1 – support; 2 – hydaulic cylinder; 3 – hydraulic cylinder of support extension.
**Рисунок 2. Стрела трубоукладчика, оснащенная опорой.** 1 – опора; 2 – гидроцилиндр; 3 – гидроцилиндр выдвижения опоры.

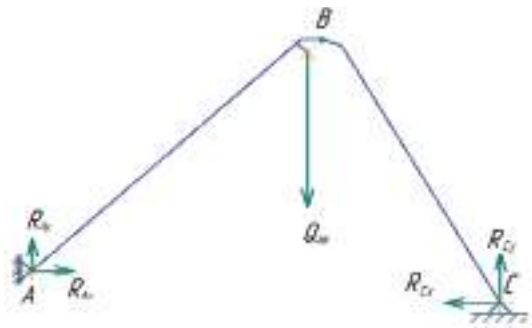



**Figure 3. Stresses and loads that effect on the boom.**
**Рисунок 3. Силы реакции и нагрузки, действующие на стрелу.**

Trench width

$$B_{tr} = 1{,}5\, D_{tr}.$$

The optimal distance between suspension points (Fig. 1) of the pipeline is calculated by the formulas

$$l_1 = 2{,}46\sqrt[4]{\frac{EIh_1}{q}},\ \ l_2 = 1{,}22\sqrt[4]{\frac{EIh_1}{q}},\ \ l_3 = 1{,}22\sqrt[4]{\frac{EIh_3}{q}},\ \ l_4 = 2{,}46\sqrt[4]{\frac{EIh_3}{q}},$$

where $EI$ is rigidity of the laid pipeline; $q$ – weight of 1 meter of the pipeline; $h_1$, $h_2$ – height of lift of the pipeline ($h_1 = h_2$, $h_3 = h_{tr} + 0{,}5$).

The load on the pipelayers (Fig. 1) was determined by the formulas [4]

$$K_1 = q\left(\frac{2}{3}l_1 + \frac{1}{2}l_2\right),\ \ K_2 = q\left(\frac{2}{3}l_2 + \frac{1}{2}l_3\right),\ \ K_3 = q\left(\frac{1}{2}l_3 + \frac{2}{3}l_4\right).$$

The analysis of the results obtained in determining the loads at the points of suspension of the pipeline with the cargo characteristic of the pipelayer TG-124 (depending on a hook radius), allowed us to conclude that there is an actual load equals to 93742 N on one of the suspension points, which does not correspond to the carrying capacity of the pipelayer equal to 67 000 N with the hook radius of 3.96 m [1].

**Load capacity of the pipelayer TG-124**
**Грузовая характеристика трубоукладчика ТГ-124**

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Hook radius (from the left edge of rolling over) ……. | 1.5 | 2.5 | 3.5 | 4.5 | 5.6 |
| Load capacity with counterweight and stability coefficient 1.4 tons ……. | 12.5 | 10.9 | 7.6 | 5.75 | 4.6 |

The boom design of the upgraded pipelayer consists of two parts, the main boom and additional support interconnected by a non-rigid binding [4]. A distinctive feature of the design is that the boom support is made in the form of an overhung hydraulic cylinder, which is pivotally connected to a shoe [4, 5]. As a hydraulic cylinder, it is proposed to use a hydraulic cylinder from the standard series 55111-8603010 [3].

Fig. 3 schematically reflects the boom of the pipelayer equipped with the support; actual reaction forces of the supporting surface and the loads while laying the pipeline in a trench are indicated [6].

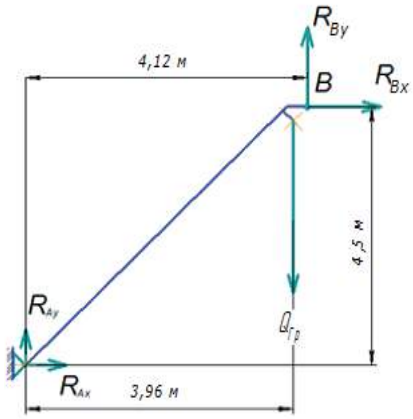



**Figure 4. Left section of the structure.**
**Рисунок 4. Левая часть конструкции.**

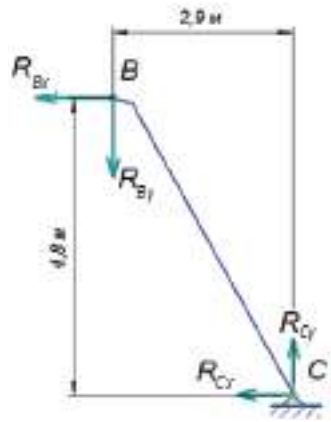



**Figure 5. Right section of the structure.**
**Рисунок 5. Правая часть конструкции.**

To determine the values of reactions $R_{Ax}$, $R_{Ay}$, $R_{Cx}$ and $R_{Cy}$, it is necessary to divide the hinge $B$, having considered the equilibrium of each of the parts and making up theforce balance equation (Fig. 4, 5). As a result, new reactions $R_{Bx}$ and $R_{By}$ appear in the hinge pivot $B$ (Fig. 5).

To determine the value of unknown forces, three force balance equations are formed:

– sum of forces about the $X$ axis;
– sum of forces about the $Y$ axis;
– sum of moments about the $A$ point [7, 8].

$$\sum F_{iX} = R_{Ax} + R_{Bx} = 0,$$
$$\sum F_{iY} = R_{Ay} + R_{By} - Q_{гр} = 0,$$
$$\sum M_A = 4,12R_{By} - 4,5R_{Bx} - 3,96Q_{гр} = 0. \quad (1)$$

The force balance equations are formed: the sum of forces about the $X$ axis; the sum of forces about the $Y$ axis; the sum of moments about the point $B$; the sum of moments about the point $C$ [9, 10].

$$\sum F_{iX} = -R_{Bx} - R_{Cx} = 0, \quad (2)$$

$$\sum F_{iY} = R_{Cy} - R_{By} = 0, \quad (3)$$

$$\sum M_C = 4,8R_{Bx} + 2,9R_{By} = 0,$$
$$\sum M_B = -4,8R_{Cx} + 2,9R_{Cy} = 0, \quad (4)$$

From the formula (2)

$$R_{Bx} = -R_{Cx}. \quad (5)$$

From the formula (3)

$$R_{By} = R_{Cy}.$$

From the formula (4)

$$R_{Cy} = \frac{4,8R_{Cx}}{2,9}. \quad (6)$$

Substituting expressions (5) and (6) into the formula (1) the reaction was found $R_{Cx}$:

$$\frac{4,8R_{Cx}}{2,9}4,12 + 4,5R_{Cx} - 3,96\,Q_{гр} = 0.$$

The resultant force of reactions $R_{Bx}$ and $R_{By}$ arising in the hinge pivot is equal to:

$$R_B = \sqrt{R_{Bx}^2 + R_{By}^2}.$$

Bending moment in the hinge pivot axis [10]

$$M_{п} = \frac{Na}{2},$$

where $N$ – cross-sectional bending force, kN; $a$ is the distance from a rod end to the loading point, cm.

The minimum torque of resistance of the cross profile of the axis [11]

$$W_{п} = \frac{M_{п}}{0,1mR},$$

where $m$ – condition load effect factor; $R$ – design resistance of round rolled steel, MPa.

The diameter of the axis is determined by the formula [12]

$$d = \sqrt[3]{10W_{п}}.$$

For further calculation, it is necessary to check the axis for section. You can do this using the formula [4, 13]

$$\frac{N}{n_{ср}\pi\left(d^2/4\right)} < mR_{ср},$$

where $n_{ср}$ – the number of sections of the axis $n_{ср} = 2$; $R_{ср}$ – section resistance, MPa.

## Research results and their discussion

In the Solid Works environment, some theoretical studies have been carried out aimed at determining the strength characteristics of the proposed design of the pipelayer boom with additional support [4, 14].

Strengthening studies were carried out in the following sequence [7]:

1. Specify the material and determine the type of boom mounting and the boom of the hydraulic cylinder (fixed hinge pivot; soil exposure on the support – fixed geometry).
2. Set the load (load is directed along the rope downwards; a cylindrical figure as the rope model installed in the rod ends of binding of the hook block; an operational force is directed to the surface of this figure with the opposite direction).
3. Build a grid on a solid body dividing the model into smaller segments.
4. Perform calculation [14].

Fig. 6 shows a curve reflecting the result of theoretical studies aimed at determining the equivalent stresses in the structure. Minimum stress values in the structure are 0.257 Pa; maximum stress values in the structure – $2.63 \cdot 10^8$ Pa.

The conducted studies have allowed us to determine the areas of accumulation of maximum stresses in the structure of the support for a given load equal to 12 tons [14, 15]. Studies have shown that the maximum stress does not exceed a permissible limit of material plasticity [3].

Fig. 7 shows a curve reflecting the result of theoretical studies aimed at determining movements in the design of the pipelayer boom support [11, 14]. Studies have shown that the minimum displacement values in the structure are 0 mm, maximum values – 4.62 mm.

Theoretical studies aimed at the study of displacements made it possible to determine the places in the support structure with possible displacements of structural details. It has been established that maximum displacements are concentrated in the place of attachment of the additional support to the hydraulic cylinder [11]. Possible movements in the structure can be prevented either by increasing the number of bolted joints or by increasing fasteners [16].

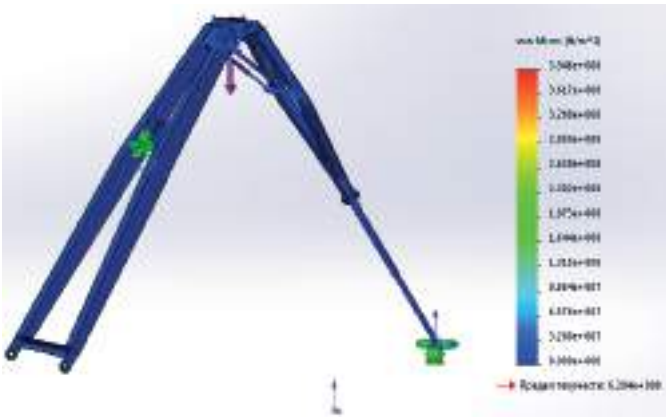


**Figure 6. Study of the stresses in the support structure of the pipelayer boom.**
**Рисунок 6. Исследование напряжений в конструкции опоры стрелы трубоукладчика.**

**Figure 7. Study of motion in the support structure of the pipelayer boom.**
**Рисунок 7. Исследование перемещений в конструкции опоры стрелы трубоукладчика.**

**Figure 8. Study of deformations in the support structure of the pipelayer boom.**
**Рисунок 8. Исследование деформаций в конструкции опоры стрелы трубоукладчика.**

**Figure 9. Study of the safety factor in the support structure of the pipelayer boom.**
**Рисунок 9. Исследование запаса прочности в конструкции опоры стрелы трубоукладчика.**

Fig. 8 shows a curve reflecting the result of theoretical studies aimed at determining the amount of deformation in the structure of the boom support [4, 17]. When a load of 12 tons is applied, the minimum amount of deformation in the structure is 1.93 $\cdot 10^{-7}$ mm, the maximum – $5.8 \times 10^{-4}$ mm.

Studies aimed at determining the deformation made it possible to determine the places of possible deformations of the proposed structure of the pipelayer boom support. Studies allowed us to conclude that the critical values in the simulation of possible maximum load capacity in the nodes of the equipment do not occur [4].

Fig. 9 shows a curve reflecting the result of theoretical studies aimed at determining the factor of safety in the structure of the boom support [4, 15]. The minimum safety margin is 1.6, and the maximum safety margin is 4.76.

Studies of the factor of safety allowed us to establish the strength characteristics along the entire length of the proposed design, as well as to determine whether the structure is able to withstand the specified loads characterized by the FOS safety factor. In order for the load to withstand the specified loads, the safety factor should be more than 1, and therefore the details in the design should be made with a safety factor more than 1.5.

## Conclusion

In the course of the research, calculated dependencies were obtained to determine the forces in the nodal connections. The obtained formulas allow us to calculate the load change from the mass of the pipe laid in the trench. It was found that the resulting stresses and displacements in the design of working equipment do not exceed critical values. The conducted strength calculation made it possible to conclude that there is a sufficient safety margin for the design of the working equipment of the pipelayer.

Application of the pipelayer with additional support can reduce the amount of equipment used when laying a pipeline. The proposed design of the boom support will allow increasing evenness of laying a pipe, increase the stability of the pipelayer and significantly secure the pipeline construction process.

## REFERENCES

1. Usanov V., Berezin A., Vorontsov A., Zhutkin V., Babakov Yu. 2015, Cost reduction in the operation of pipelayers. *Tekhnadzor* [Technical Supervision], no. 11 (108), pp. 686–687. (*In Russ.*)
2. Parshin D. Ya., Shoshiashvili D. Ya. 1990, Automatic stability control of pipelayers. *Stroitel'nyye i dorozhnyye mashiny* [Construction and road building machinery], no. 10, pp. 16–18. (*In Russ.*)
3. Voronin A. N., Lipsky V. K., Serenkov P. S. 2012, Analysis of the accident rate of the main pipeline transport in the Republic of Belarus, the Russian Federation, the countries of Western Europe and the USA. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the Polotsk State University], F series: Construction. Applied sciences, no. 16, pp. 69–74. (*In Russ.*)
4. Voronin A. N., Lipsky V. K. 2014, *Opisaniye seti protsessov v magistral'nom truboprovodnom transporte s ispol'zovaniyem sistemy funktsional'nogo modelirovaniya* [Description of the network of processes in the main pipeline transport using the functional modeling system]. Reliability and safety of the main pipeline transport: Collection of works at VIII International scientific-technical conference. Ed. by V. K. Lipsky, pp. 49–51.
5. Vashchuk I. M., Utkin V. I., Harkun B. I. 1989, *Truboukladchiki* [Pipelayers]. Moscow, 180 p.
6. Dudoladov, Yu. A. 1981, *Krany-truboukladchiki* [Cranes-pipelayers]. Moscow, 240 p.
7. Teterina I. A., Korchagin P. A., Letopolsky A. B. 2018, Investigation of soil destruction by trench chain excavator cutting element process. Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering ICIE 2018: Lecture Notes in Mechanical Engineering. Moscow, Russia, 15–18 May 2018. Cham, pp. 2123–2132. https://doi.org/10.1007/978-3-319-95630-5_229
8. Teterina I. A. 2017, *Povysheniye effektivnosti sistemy vibrozashchity operatora dorozhnoy podmetal'no-uborochnoy mashiny* [Improving the effectiveness of vibration system of operator's machine sweeper], master thesis. Omsk, 18 p.
9. Dobronravov S. S., Dobronravov M. S. 2006, *Stroitel'nyye mashiny i oborudovaniye* [Construction machinery and equipment]: reference book. 2nd ed., updated and revised. Moscow, 445 p.
10. Korytov M. S., Shcherbakov V. S., Titenko V. V. 2018, Analytical solution of the problem of acceleration of cargo by a bridge crane with constant acceleration at elimination of swings of a cargo rope. *Journal of Physics*: Conference Series, vol. 944, no. 1. https://doi.org/10.1088/1742-6596/944/1/012062
11. Denisova L. A., Meshcheryakov V. A. 2018, Control systems design: the technology of stochastic perturbations simulation. *Journal of Physics*: Conference Series, vol. 1050, no. 1. 012020. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1050/1/012020
12. Boyarkina I. V. , Tarasov V. N. 2017, Regularities of the working equipment elements mass reduction to the hydraulic power cylinder piston for the bucket boom machines size standard. *Journal of Physics*: Conference Series, vol. 858, no. 1.
13. Shcherbakov V. S., Korytov M. S., Shershneva E. O. 2016, Influence of an obstacle on load displacement by a gantry crane. *Russian Engineering Research*, vol. 36, no. 3, pp. 194–197. https://doi.org/10.3103/S1068798X16030151

14. Vasilyev V. I., Ovsyannikov V. E., Ziganshin R. A., Terekhov A. S. 2018, Peculiar features of formation of surface roughness profile upon mechanical processing of iron parts of handling machines after diffusion alloying. International *Journal of Mechanical Engineering and Technology*, vol. 9 (3), pp. 1061–1067. Link
15. Zarubin V. N. 1984, *Truboukladchik* [Pipelayer], Moscow, 134 p.
16. Korneyev S. A., Korneyev V. S., Voronov E. A., Chernyavskiy D. I., Romanyuk D. A. 2018, Thermodynamically matched description of highly elastic couplings load characteristics considering misalignment of the attached shafts. AIP Conference Proceedings. 030006. https://doi.org/10.1063/1.5051867
17. Harkun B. I., Vereynov O. V., Utkin V. I., Shevelenko V. I., Sliskov V. I., Zakharchuk B. Z. 1979, *Kran-truboukladchik* [Pipelayer crane]. Patent RF no. 703490.

*The article was received on September 3, 2018*

УДК 624.042.12 https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-1-96-102

# Результаты исследований модернизированного оборудования трубоукладчика

**Павел Александрович КОРЧАГИН***,
**Антон Борисович ЛЕТОПОЛЬСКИЙ****,
**Ирина Алексеевна ТЕТЕРИНА*****

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), Россия, Омск

***Актуальность и цель работы.*** Вертикальные и горизонтальные колебания трубопровода, приводящие к неравномерному распределению его массы и, как следствие, к потере устойчивости самого крана-трубоукладчика, – проблема современного машиностроения, не имеющая однозначного решения на сегодняшний день. В статье представлен вариант совершенствования конструкции дополнительной опоры стрелы трубоукладчика. Предложенное техническое решение позволяет увеличить плавность укладки трубы и повысить устойчивость трубоукладчика в рабочем режиме. Результат достигается путем добавления дополнительных элементов в конструкцию опоры стрелы трубоукладчика.
***Методы.*** Прочностной расчет предлагаемой конструкции существующим методом достаточно трудоемок. Для определения критических напряжений, величин деформации и максимальных перемещений в конструкции использован программный продукт SolidWorks.
***Результаты и их обсуждение.*** Предложенная конструкция предполагает соединить с грузовой стрелой опору, состоящую из гидравлического цилиндра и металлической основы, используемую для крепления цилиндра к опоре с помощью болтового соединения. Для подтверждения работоспособности предложенного конструкторского решения приведены зависимости, составленные на основании расчетной схемы рабочего оборудования трубоукладчика. Расчетные зависимости позволяют определить величину нагрузок, действующих на трубоукладчик.
***Выводы.*** Результаты теоретических исследований, проведенных в программном продукте SolidWorks, представлены графически и отражают напряжения, перемещения и деформации в конструкции стрелы машины для укладки магистрального трубопровода. Дополнительно в результате исследований установлена величина запаса прочности в конструкции опоры стрелы трубоукладчика. Представленные эпюры эквивалентных напряжений, величин деформации, коэффициента запаса прочности и возможных перемещений в конструкции модернизированного оборудования дают право сделать вывод о работоспособности предлагаемой конструкции стрелы трубоукладчика.

*Ключевые слова:* трубоукладчик, строительство трубопровода, строительно-дорожные машины, магистральный трубопровод, стрела трубоукладчика, рабочее оборудование.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Усанов В., Березин А., Воронцов А., Жуткин В., Бабаков Ю. Снижение затрат при эксплуатации кранов-трубоукладчиков // ТехНадзор. 2015. № 11 (108). С. 686–687.
2. Паршин Д. Я., Шошиашвили М. Э. Автоматический контроль устойчивости кранов-трубоукладчиков // Строительные и дорожные машины. 1990. № 10. С. 16–18.
3. Воронин А. Н., Липский В. К., Серенков П. С. Анализ аварийности магистрального трубопроводного транспорта в Республике Беларусь, Российской Федерации, странах западной Европы и США // Вестник ПГУ. Сер. F. «Строительство. Прикладные науки». 2012. № 16. С. 69–74.
4. Воронин А. Н., Липский В. К. Описание сети процессов в магистральном трубопроводном транспорте с использованием системы функционального моделирования // Надежность и безопасность магистрального трубопроводного транспорта: сб. тезисов VIII Междунар. науч.-техн. конф. Новополоцк: ПГУ, 2014. С. 49–51.
5. Ващук И. М., Уткин В. И., Харкун Б. И. Трубоукладчики. М.: Машиностроение, 1989. 180 с.
6. Дудоладов Ю. А. Краны-трубоукладчики. М.: Высш. школа, 1981. 240 с.
7. Teterina I. A., Korchagin P. A., Letopolsky A. B. Investigation of soil destruction by trench chain excavator cutting element process // Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering ICIE 2018: Lecture Notes in Mechanical Engineering, Moscow, Russia, 15–18 May 2018. Cham: Springer, 2018. P. 2123–2132. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-95630-5_229
8. Тетерина И. А. Повышение эффективности системы виброзащиты оператора дорожной подметально-уборочной машины: автореф. дис. … канд. техн. наук. Омск, 2017. 18 с.
9. Добронравов С. С., Добронравов М. С. Строительные машины и оборудование: справочник. 2-е изд, перераб. и доп. М.: Высш. школа, 2006. 445 с.
10. Korytov M. S., Shcherbakov V. S., Titenko V. V. Analytical solution of the problem of acceleration of cargo by a bridge crane with constant acceleration at elimination of swings of a cargo rope // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 944, № 1. 012062. https://doi.org/10.1088/1742-6596/944/1/012062
11. Denisova L. A., Meshcheryakov V. A. Control systems design: the technology of stochastic perturbations simulation // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1050, № 1. 012020. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1050/1/012020
12. Boyarkina I. V., Tarasov V. N. Regularities of the working equipment elements mass reduction to the hydraulic power cylinder piston for the bucket boom machines size standard // Journal of Physics: Conference Series. 2017. Vol. 858. № 1. 012006. https://doi.org/10.1088/1742-6596/858/1/012006
13. Shcherbakov V. S. Korytov M. S., Shershneva E. O. Influence of an obstacle on load displacement by a gantry crane // Russian Engineering Research. 2016. Vol. 36, № 3. P. 194–197. https://doi.org/10.3103/S1068798X16030151
14. Vasilyev V. I., Ovsyannikov V. E., Ziganshin R. A., Terekhov A. S. Peculiar features of formation of surface roughness profile upon mechanical processing of iron parts of handling machines after diffusion alloying // International Journal of Mechanical Engineering and Technology. 2018. Vol. 9, № 3. P. 1061–1067. Link
15. Трубоукладчик / В. Н. Зарубин [и др.]. М:. Высш. школа, 1984. 134 с.
16. Korneyev S. A., Korneyev V. S., Voronov E. A., Chernyavskiy D. I., Romanyuk D. A. Thermodynamically matched description of highly elastic couplings load characteristics considering misalignment of the attached shafts // AIP Conference Proceedings. 2018. 030006. https://doi.org/10.1063/1.5051867
17. Кран-трубоукладчик: пат. 703490 СССР / Харкун Б. И., Верейнов О. В., Уткин В. И., Шевеленко В. И., Слисков В. И., Захарчук Б. З. № 2562360/29-11; заявл. 02.01.78; опубл. 15.12.79, Бюл. № 46.

*Статья поступила в редакцию 3 сентября 2018 г.*

* korchagin_pa@mail.ru
https://orcid.org/0000-0001-8936-5679
** Antoooon-85@mail.ru
https://orcid.org/0000-0003-3503-131X
*** iateterina@mail.ru
https://orcid.org/0000-0001-8012-8511

*Известия Уральского государственного горного университета. 2019. Вып. 1(53). С. 103-114*

УДК 551.24 https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-1-103-114

# Идентификация механизма тектонических движений земной коры

**Аббас Гейдар оглы РЗАЕВ**[1, 2*],
**Сакит Рауф оглы РАСУЛОВ**[2,**]

[1]Институт систем управления НАНА, Азербайджан, Баку
[2]Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности, Азербайджан, Баку

**Актуальность.** Землетрясения происходят в межплитном пространстве тектонических плит при их взаимном (относительном) движении в литосфере. При этом в зависимости от ситуации происходят процессы субдукции, коллизии и спрединга плит, которые приводят к накоплению напряжения до значения, превышающего устойчивость горной породы, и возникновению землетрясения. Однако в настоящее время нет четкого представления о природе силы, двигающей литосферные плиты земной коры. Считается, что горизонтальное движение плит происходит за счет мантийных теплогравитационных течений – конвекции. Источником энергии для этих течений служит разность температуры между температурой центральных областей Земли и температурой ее поверхности. Однако данная гипотеза не может четко объяснить процесс спрединга между плитами. Наряду с эндогенными силами на движение плит наиболее существенно влияют экзогенные (космогенные) силы. Следовательно, определение и математическое описание характера и особенностей этих сил является актуальной задачей, чему посвящена данная статья.
**Цель работы.** Математическое описание ускоренного движения планеты Земля вокруг Солнца и вокруг центра нашей Галактики, приводящего к колебательному движению литосферных плит.
**Методология исследования.** В работе использованы методы математического моделирования, теория движения блоков земной коры и дрейфа континентов, законы механики и орбитального движения Земли вокруг Солнца и Солнечной системы вокруг центра нашей Галактики.
**Результаты.** Разработаны математические модели процесса ускоренного орбитального движения планеты Земля вокруг Солнца и центра нашей Галактики с учетом приливной силы, силы, создаваемой магнитным полем Земли (силы Лоренца), силы трения между дном океана и океанской водой и силы Кориолиса. Показано, что предложенные модели с относительной погрешностью 4 % адекватно описывают орбитальное движение планет Меркурия и Марса вокруг Солнца.
**Выводы.** В результате комплексного исследования выявлено, что одним из главных факторов, провоцирующих движение тектонических плит, является ускоренное орбитальное движение Земли относительно центра нашей Галактики. При этом происходит передача огромного количества движения в горизонтальном направлении, приводящего к деформации (растяжение и сжатие) земной коры и повышению вероятности возникновения землетрясений в сейсмоактивных (дислокационных) зонах. Предложена математическая модель силы тектонического движения земной коры. Показано, что модель адекватно описывает ускоренное орбитальное движение планет Меркурия и Марса. При описании орбитального движения Земли учитываются дополнительные силы, такие как приливная сила, сила, создаваемая магнитным полем Земли, сила трения между дном океана и океанской водой, сила Кориолиса. Показано, что сила, движущая тектонические плиты, имеет космогенную природу.

*Ключевые слова:* тектонические плиты, глобальная тектоника, землетрясение, ядро, мантия, астеносфера.

## Введение

Современная геологическая теория о движении литосферы утверждает, что земная кора (ЗК) состоит из относительно целостных блоков – тектонических плит, которые находятся в постоянном движении относительно друг друга.

При этом в зонах расширения (срединно-океанических хребтах (рис. 1) и континентальных рифтах) в результате спрединга образуется новая океанская кора (рис. 2), а старая поглощается в зонах субдукции.

Впервые идея о движении блоков земной коры была высказана в теории дрейфа континентов, предложенной Альфредом Вегенером в 1920-х гг. [1]. Эта теория была первоначально отвергнута. Возрождение идеи о движении в твердой оболочке Земли произошло в 1960-х гг., когда в результате исследования рельефа и геологии океанского дна были получены данные, свидетельствующие о процессах расширения (спрединга) океанской коры, пододвигания одних частей земной коры под другие (субдукция).

Объединение этих представлений со старой теорией дрейфа материков породило современную теорию тектоники плит (ТП), которая скоро стала общепринятой концепцией в науках о Земле.

В теории ТП ключевое положение занимает понятие геодинамической обстановки характерной структуры с определенным соотношением плит. В одной и той же геодинамической обстановке происходят однотипные тектонические, магматические, сейсмические и геохимические процессы.

За прошедшие десятилетия ТП значительно изменила свои основные положения. Ныне их можно сформулировать следующим образом.

Верхняя часть твердой Земли делится на хрупкую литосферу и пластичную астеносферу (рис. 3). Считается, что конвекция в астеносфере – главная причина движения плит. Современная литосфера делится на 8 крупных плит и множество мелких. Мелкие плиты расположены в поясах между крупными плитами. Сейсмическая, тектоническая и магматическая активность сосредоточена на границах плит.

При этом основными позитивными элементами тектонических гипотез являются контракционная, пульсационная, ротационная, глубинная дифференциации.

На плиты кроме силы вязкостного трения действуют также и другие, меньшие по величине, но также важные силы. Это силы Архимеда, обеспечивающие плавание более легкой коры на поверхности более тяжелой мантии и приливные силы, обусловленные гравитационным воздействием Луны и Солнца [2, 3].

*abbas_r@mail.ru
https://orcid.org/0000-0003-2286-1074
** rasulovsakit@gmail.com
https://orcid.org/0000-0002-1548-3143

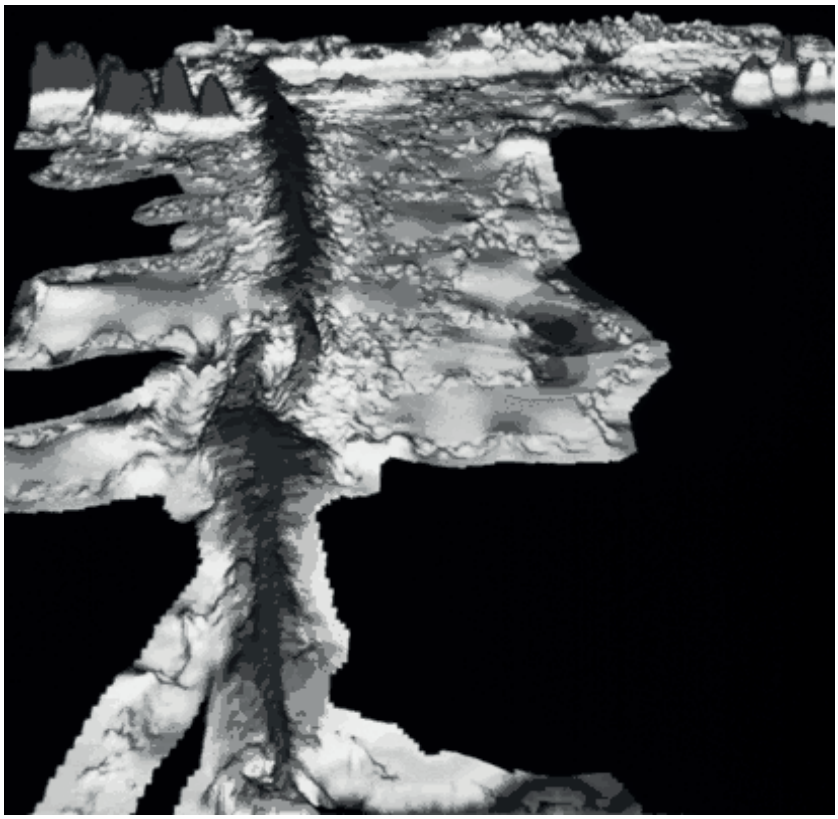


**Рисунок 1. Среднеокеанский хребет.**
**Figure 1. Mid-ocean range of mountains.**

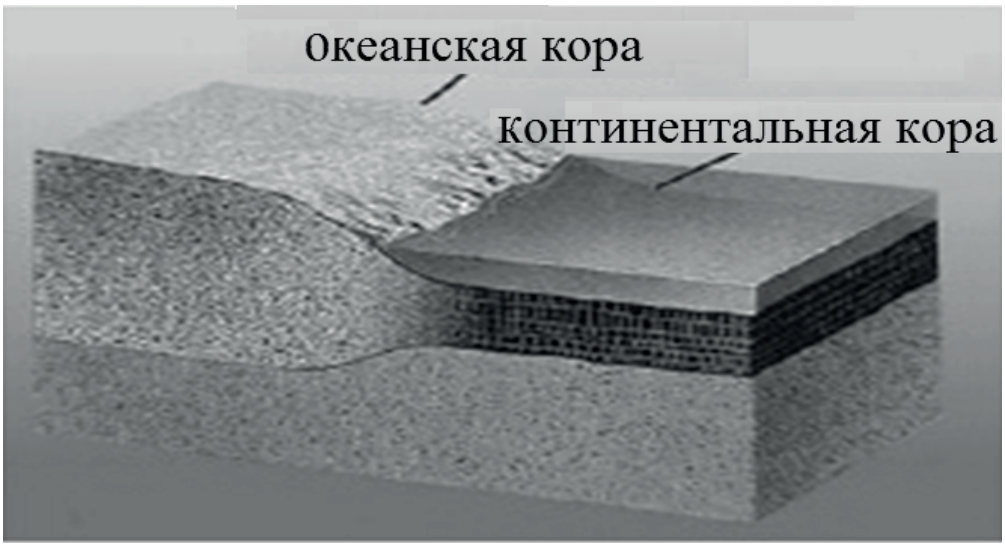



**Рисунок 2. Океанская и континентальная кора.**
**Figure 2. Ocean and continental crust.**

Таким образом, теория тектоники литосферных плит – впервые в истории геологии физически обоснованное объяснение главных сторон тектонической жизни Земли, а также других производных от нее геологических процессов (магматизм, метаморфизм, сейсмичность, геоморфогенез, седиментогенез).

За четверть века эта теория получила убедительное подтверждение, в том числе глубоководным бурением, изучением океанского ложа со спускаемых подводных аппаратов, сейсмической томографией, методом космической геодезии, хотя одновременно выяснилась ее измененная схематичность и недостаточная полнота. Основные принципы этой теории остаются незыблемыми: дискретность (фрактальность) в строении литосферы, ее значительная подвижность не только в вертикальном (радиальном), но и в горизонтальном (тангенциальном, латеральном) направлении, связь этой подвижности с конвекцией мантии.

В отличие от изложенного, в работах [3, 4] указываются, что горизонтальное движение плит за счет конвективных потоков связано с ротационным режимом планеты Земля, т. е. происходит вращение геосфер от ядра до мантии, и эти движения достигают поверхности. Но скорость на поверхности, по данным [5], колеблется от 1,8 до 4 см/год.

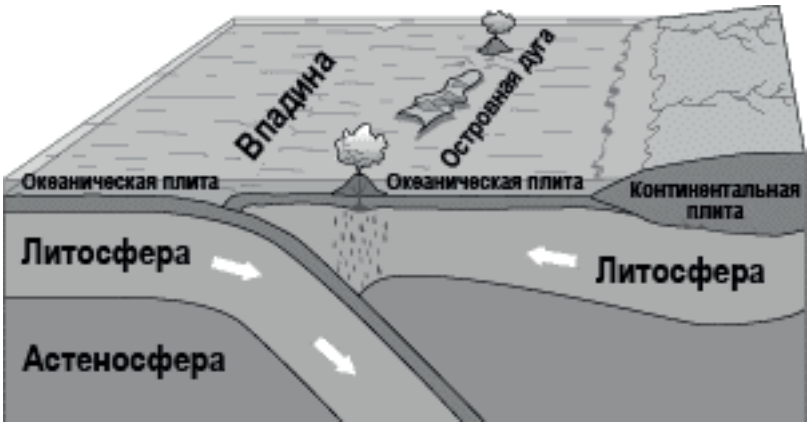



**Рисунок 3. Субдукция океанской коры подконтинентальной корой.**
**Figure 3. Subduction of oceanic crust with subcontinental crust.**

Гашение скорости, передаваемой от ядра (вращение которого достигает 20–40 м/с [6]), нижней и верхней мантии со скоростью 1–10 м/год, начинает происходить на уровне геосфер. Вращение геосфер и приводит литосферу в движение.

В работе [5] проанализированы данные о протяженности дивергентных (от лат. *расходящийся*) и конвергентных (от лат. *сходящийся*) границ и скорости перемещения литосферных плит в течение разных геологических отрезков времени. Обосновывается вывод о наличии прямолинейной зависимости между размерами литосферных плит и скоростями рифтинг-спредингового процесса на дивергентных границах. Показывается, что скорость субдукции (от лат. *пододвигание*) не зависит от протяженности плиты. Установленные закономерности тектонических процессов дают основания для предположения об их связи с ротационно обусловленными волновыми движениями земной коры.

Как показано ранее, сейсмичность является производной от тектонических движений литосферных плит. В связи с этим следует отметить важность исследования, приведенного в работе [6], где установлено наличие пропорциональной зависимости между скоростями миграции землетрясений и их магнитудами, т. е. величинами сейсмической энергии, выделяемой в их очагах. Оказалось возможным проинтегрировать эту зависимость в виде ротационно обусловленных волновых движений планетарного масштаба [7].

Показано, что сейсмичность тесно взаимосвязана с процессами, которые протекают в областях стыка ТП, являющихся прямым результатом их взаимодействия. Закономерность перемещения ТП и их взаимодействия в последнее время чаще описывают в рамках волновых геодинамических моделей, учитывающих особенности вращения планеты [5, 6, 8].

В работах [9–13] механизм погружения ТП обосновывается тем, что под влиянием сжимающих сил, действующих вдоль литосферного слоя, этот слой изгибается и происходит эклогитизация данного слоя горной породы.

Предлагается другой механизм, связанный с растяжением континентальной коры для объяснения его погружения на склонах Баренцевского и Прикаспийского сверхглубоких прогибов [14, 15].

В работах [16, 17] предложены новые методы мониторинга напряжения, возникающие в результате взаимодействия ТП.

Достаточно полная подборка данных о скоростях геологических процессов приведена в работе [18]. Данные из этой работы, характеризующие значения скоростей субдукции и протяженности ТП планеты, представлены в табл. 1.

Подробные данные о параметрах зон субдукции, содержащиеся в работе [19], представлены в табл. 2.

Всегда считалось, что наиболее вероятной причиной движения ТП является процесс конвекции в мантии, но в

**Таблица 1. Значения скоростей субдукции.**
**Table 1. Subduction velocity values.**

| Область | Пододвигание литосферных плит | Длина зоны, *L*, км | Скорость субдукции *V*, мм/год |
|---|---|---|---|
| Курилы, Камчатка, Хонсю | Тихоокеанская под Евразийскую | 2800 | 75 |
| О-ва Тонга и Кермадек, Новая Зеландия | Тихоокеанская под Индийскую | 3000 | 82 |
| Центральная Америка и Мексика | Кокос под Северо-Американскую | 2800 | 95 |
| Алеутские о-ва | Тихоокеанская под Северо- Американскую | 3800 | 35 |
| Ява, Суматра, Бирма | Индийская под Евразийскую | 5700 | 67 |
| Южные Сандвичевы о-ва | Южно-Американская под Скоша | 650 | 19 |
| Карибское море | Южно-Американская под Карибскую | 1350 | 5 |
| Эгейское море | Африканская под Европейскую | 1550 | 27 |
| Соломоновы о-ва, Новые Гебриды | Индийская под Тихоокеанскую | 2750 | 87 |
| О-ва Бонин и Марианские | Тихоокеанская под Филиппинскую | 4450 | 12 |
| Иран | Аравийская под Евразийскую | 2250 | 45 |

**Таблица 2. Параметры зон субдукции.**
**Table 2. Parameters of subduction zones.**

| Зона субдукции | Длина островной дуги над зоной субдукции, км | Скорость субдукции, см/год | Возраст коры погружающейся плиты/номера линейных магнитных аномалий в ней | $T_1 - T_2 = \tau$, млн лет |
|---|---|---|---|---|
| Восточно-Алеутская | 1625 | 5,8–6,4 | Палеоцен–эоцен/18–24 | 54 – 43 = 11 |
| Западно-Алеутская | 1000 | 7,7 | Палеоцен–эоцен/20–26 | 59 – 45 = 14 |
| Северо-Курильско-Камчатская | 1125 | 8,3 | Ранний-поздний мел/30–M0 | 119 – 67 = 52 |
| Южно-Курильская | 950 | 9,5 | Ранний мел/M1–M5 | 128 – 123 = 5 |
| Японская (северная часть) | 1700 | 9,5–10,3 | Ранний мел/M5–M16 | 145 – 128 = 13 |
| Японская (южная часть) | 875 | 6,2 | Палеоцен–средний миоцен/6–22 | 51 – 20 = 31 |
| Рюкю | 1100 | 5,2–6,5 | Палеоцен–эоцен/18–21 | 49 – 43 = 6 |
| Филиппинская (южная часть) | 1000 | 7,0–9,3 | Палеоцен–эоцен/18–22 | 51 – 43 = 8 |
| Идзу-Бонинская | 1380 | 4,7–7,7 | Поздняя юра–ранний мел/M5–M21 | 154 – 128 = 26 |
| Марианская | 3000 | 3,1–3,8 | Поздняя юра/M21–M32 | 169 – 154 = 15 |
| Западно-Зондская | 3000 | 6,0–6,7 | Эоцен–ранний мел/20–M4 | 128 – 45 = 83 |
| Восточно-Зондская | 2250 | 7,6–8,0 | Поздняя юра/M16–M26 | 163 – 145 = 18 |
| Новая Британия и Соломоновы о-ва | 2400 | 10,3 | Палеоцен–плиоцен/2–26 | 59 – 2 = 57 |
| Новые Гебриды | 2000 | 8,5 | Эоцен–средний миоцен/9–23 | 53 – 30 = 23 |
| Тонга–Кермадек | 3250 | 5,5–9,3 | Поздняя юра–ранний мел/M0–M16 | 145 – 119 = 26 |
| Анды | 9000 | 7,4–15,4 | Эоцен–средний миоцен/5–22 | 51 – 10 = 41 |
| Центральная Америка и Мексика | 3125 | 6 | Средний миоцен–четвертичный период/1–6 | 20 – 1 = 19 |

отличие от указанного появились модели, основанные на гравитационной неустойчивости. Для разрешения этого узлового вопроса, как отмечено в работе [20], требуются дальнейшие исследования тектоники плит.

## Цель работы

Математическое описание ускоренного движения планеты Земля вокруг Солнца и вокруг центра нашей Галактики, приводящего к колебательному движению литосферных плит.

Для решения поставленной задачи нами проведено исследование наиболее вероятных экзогенных и эндогенных факторов, влияющих на движение тектонических плит.

В результате комплексного подхода было выявлено, что одним из основных факторов, провоцирующих движения ТП, является ускоренное орбитальное (продольное) движение Земли (изменение абсолютной скорости по направлению и по значению) с годовым периодом. В связи с этим в данной статье рассматривается вопрос идентификации механизма тектонических движений земной коры, приводящих к возникновению землетрясений.

## Методология исследования

В работе использованы методы математического моделирования, теория движения блоков земной коры и дрейфа континентов, законы механики и орбитального движения Земли вокруг Солнца и Солнечной системы вокруг центра нашей Галактики.

## Результаты

В работе [20] предложено выражение для отклика упругой плиты полубесконечной длины на синусоидальное воздействие $P = P_0 \sin \omega t$ с периодом $T = 2\pi/\omega$, приложенное на краю $x = 0$. Смещение имеет вид

$$u(x, t) = -(P_0/\sqrt{2}\,RE)\exp(-Rx)\cos(\omega t - Rx + \pi/4),$$

а давление при этом определяется формулой

$$P(x, t) = P_0 \exp(Rx)\sin(\omega t - Rx),$$

где $P_0$ – амплитуда давлений; $E$ – модуль Юнга, $x$ – расстояние, $R = \sqrt{1/2\omega t}$, $\omega$ – угловая частота, $v = \omega/R$ представляет собой скорость цуга напряжения (или деформации) в направлении $x$.

Поскольку ГП по своей природе вязкоупруги, вертикальные напряжения порождают горизонтальные составляющие.

Горизонтальные напряжения в земной коре (ЗК) видоизменяются под действием тектонических сил, которые действуют на протяжении всей геологической истории. Они сводят действительные напряжения в горных породах (ГП) к трем неравным основным составляющим, которые действуют под прямыми углами друг к другу. В таком случае $\sigma_1$ – наибольшее основное напряжение, $\sigma_2$ – промежуточное по амплитуде основное напряжение, а $\sigma_3$ – наименьшее основное напряжение. Три возможных схемы действия этих напряжений показаны на рис. 4, а. Когда разность между $\sigma_1$ и $\sigma_3$ превышает прочность ГП, происходит сброс и напряжение снимается, но затем постепенно вновь возрастает.

Условия возникновения сброса могут быть выявлены путем построения диаграммы Мора на основании результатов испытания образцов ГП в камере при трехмерных нагрузках. Рассмотрим рис. 4, б, на котором значения продоль-

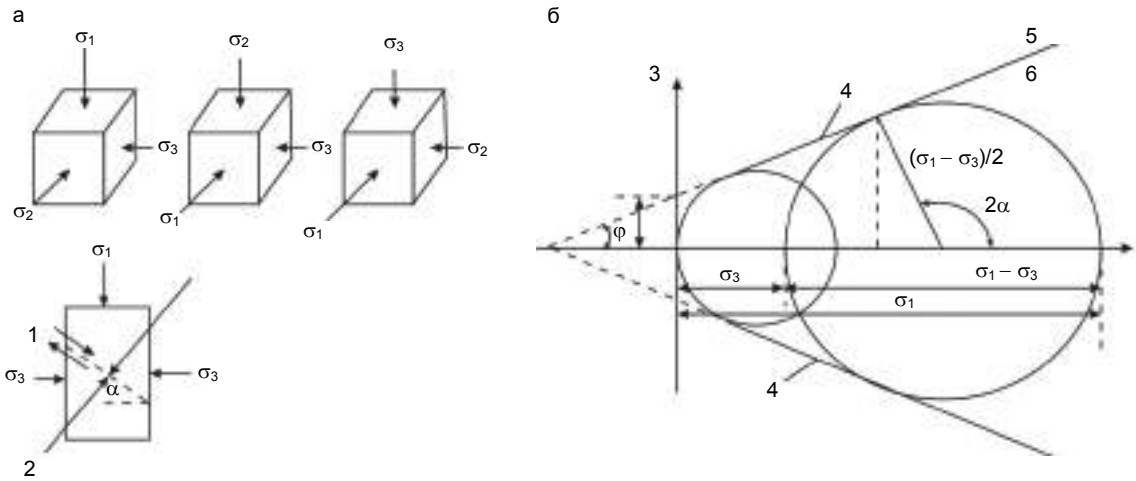



**Рисунок 4. Напряжения в земной коре**. а – возможные схемы проявления напряжений в земной коре; б – диаграмма Мора для пластического разрушения ГП; 1 – напряжение сдвига; 2 – нормальное напряжение; 3 – дифференциальное напряжение 4 – линия разрушения; 5 – зона неустойчивости; 6 – зона устойчивости.

**Figure 4. Stresses in the earth's crust.** a – possible ways of occurrence of stresses in the earth's crust; б – Mohr's diagram for plastic fracture; 1 – shearing force; 2 – normal stress; 3 – differential stress; 4 – line of fracture; 5 – zone of instability; 6 – stability zone.

ного и поперечного напряжения ($\sigma_1$ и $\sigma_3$ соответственно) при максимальном напряжении сдвига на кривой «деформация–напряжение» отложены на оси абсцисс, а через отрезок, соответствующий их разности, проведена окружность с центром на этой оси.

Эта процедура повторяется для нескольких значений давления обжима. Площадь, ограниченная касательными к полученным окружностям, определяет условие устойчивости. Точка пересечения линии разрушения с осью ординат дает значение прочности сцеплений $\tau_0$ горной породы, а наклон φ этой линии определяет угол внутреннего трения, который является мерой прочности.

С учетом геометрических соотношений на диаграмме Мора можно показать, что $\sigma_3$, $\sigma_n$, τ могут быть определены следующими выражениями:

$$\sigma_3 = \sigma_1 (1 - \sin \varphi)/(1 + \sin \varphi) - (2\, c \cos \varphi)/(1 + \sin \varphi);$$

$$\sigma_n = 0{,}5\, (\sigma_1 + \sigma_3) - 0{,}5\, (\sigma_1 - \sigma_3) \cos 2\, (90 - \mu);$$

$$\tau = 0{,}5\, (\sigma_1 - \sigma_3) - \sin 2\, (90 - \mu),$$

где $c$ – прочность сцепления.

В работах [21–23] приведены диаграммы нагружения (рис. 5), где показано, что на начальном этапе деформации на диаграмме нагружения практически всегда существует более пологий, чем основной, квазилинейный упругий участок. Этот участок деформации объясняет наличие приоткрытых в породе трещин. В работе [22] с учетом экспериментов нами получена адекватная математическая модель (с погрешностью 2,13 %) в следующем виде:

$$Q = 237\, (1 - 2{,}64 \exp(-\varepsilon/0{,}017)) + 1{,}64 \exp(-\varepsilon/0{,}023),$$

где $Q$, ε – соответственно напряжение и деформация в горной породе.

Из изложенного следует, что вертикальные напряжения в ГП порождают горизонтальные составляющие. Однако приведенные нами комплексные исследования показали, что на горизонтальные составляющие напряжения ГП кроме геостатического давления не менее существенно влияет также ускоренное орбитальное движение Земли, в результате которого в ГП в горизонтальном направлении передается огромное количество движения – $\Delta v m_3$ (где $\Delta v$, $m_3$ – соответственно изменение абсолютной орбитальной скорости и масса Земли), приводящие к деформации (растяжение и сжатие) ЗК. При совпадении частоты колебательных движений ЗК с частотой сейсмоактивной точки ГП возникает резонанс, способствующий сдвигу плит относительно друг друга и возникновению землетрясения. Далее приводится предложенная нами идентификация механизма тектонических движений ЗК, способствующих возникновению землетрясения.

Как известно, все планеты, в том числе Земля, вращаются вокруг Солнца и, как полагал Коперник, должны описывать окружности. Однако в ходе своего наблюдения за орбитой Марса Кеплер заметил, что эта орбита не окружность, а имеет форму эллипса. В дальнейшем было выяснено, что все планеты, вращаясь вокруг Солнца, описывают эллипс, в одном из фокусов которого находится Солнце. Следовательно, возникает естественный вопрос, чем же вызвана деформация кругового движения (движение по эллипсу). Сам Кеплер не знал причину деформации, так как он рассматривал изолированную солнечную систему, где Солнце покоится, а все планеты вращаются вокруг него. А в действительности Солнечная система в целом движется вокруг центра нашей Галактики со скоростью 250 км/с [24]. Следовательно, при

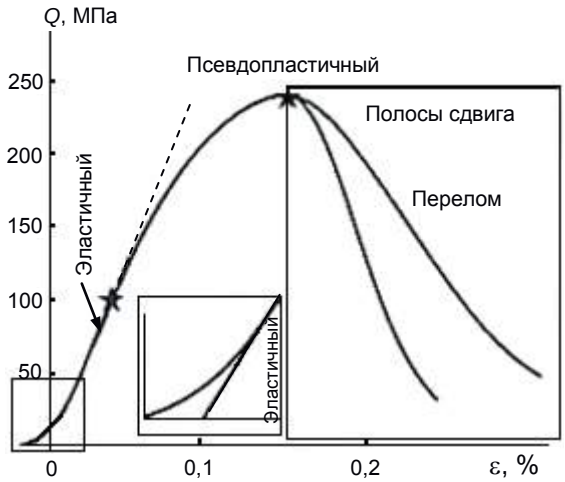



**Рисунок 5. Характерный вид диаграмм нагружения образцов горных пород при дилатансивном режиме деформации.**
**Figure 5. Typical form of loading diagrams of rock samples during dilatancy deformation.**

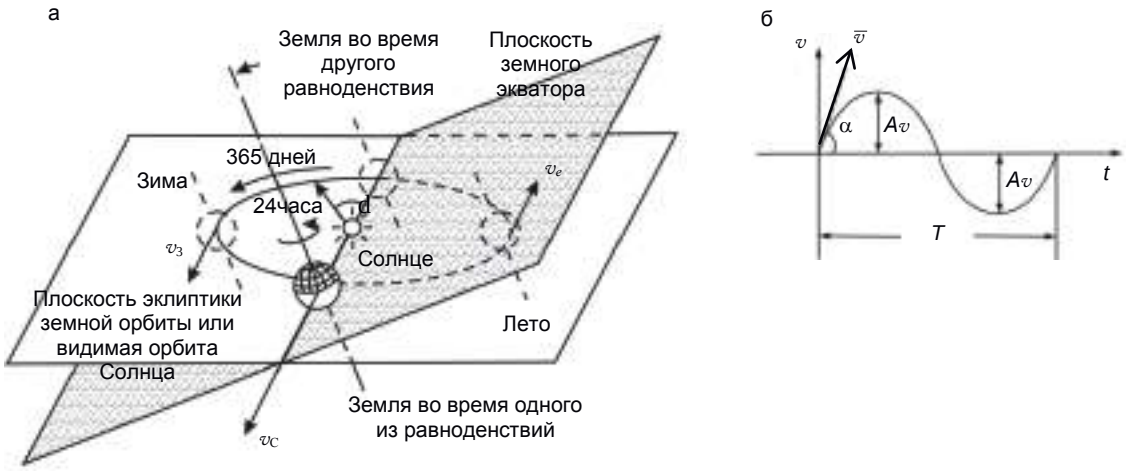



**Рисунок 6. Ускоренное движение Земли.** а – орбитальное движение Земли относительно движения Солнца; б – изменение абсолютной скорости Земли; *t* – время; *T* – годовой период (365,25 дней) обращения Земли, *v* – вектор скорости.
**Figure 6. Accelerated movement of the Earth.** a – orbital movement of the Earth relative to the movement of the Sun; b – change in the absolute speed of the Earth; t – time; T – annual period (365.25 days) of the Earth's revolution, v – velocity vector.

этом абсолютная орбитальная скорость движения планет $v$ будет изменяться не только по направлению с ускорением $v^2/r$, а также по значению согласно предложенной модели [7]:

$$v = v_C + A_v \sin \alpha \tag{1}$$

с ускорением

$$\frac{\Delta v}{\Delta T} = \frac{2A_v\left(\sin 90^o - \sin 270^o\right)}{T}, \tag{2}$$

где $v_C$ – продольная скорость Солнца; $A_v$ – амплитуда орбитальной скорости планет; $T$ – период вращения планет; α – угол между вектором скорости и времени, $\alpha = \omega t$.

Геометрическая интерпретация модели (1) на примере планеты Земля представлена на рис. 6, из которого видно, что при $\alpha = 0^o, 180^o$ $v = v_C = 250$ км/с. А при значениях $\alpha = 90^o, 270^o$ соответственно $v\,(90^o) = v_C + A_v$ и $v\,(270^o) = v_C - A_v$.

Проведенные нами расчеты показали адекватность математической модели (1) при описании движения планет группы Земли – Меркурия и Марса (табл. 3).

В случае движения Земли (рис. 6) с фактическим диапазоном изменения орбитальной скорости от 29,3 км/с в афелии до 30,3 км/с в перигелии адекватность модели (1) не соблюдается [25, 26].

Это связано с объективными причинами, заключающимися в том, что Земля по сравнению с планетами Меркурий и Марс, которые не имеют спутников, океанов, существенного магнитного поля (в 100 раз меньше МП Земли) и наклонения к эклиптике (рис. 7), подвержена дополнительному ускорению, которое можно определить следующим образом:

$$a_3 = \frac{\Delta v}{\Delta T} - \frac{1}{m_3}\sum_{i=1}^{4} F_i = \frac{2A_v\left(\sin 90^o - \sin 270^o\right)}{T} - \frac{1}{m_3}\left(F_1 + F_2 + F_3 + F_4\right), \tag{3}$$

**Таблица 3. Расчет погрешности модели (1).**
**Table 3. Calculation error model (1).**

| По предложенной модели | По фактическим данным [7,9, 26] | Погрешность модели |
|---|---|---|
| | *Для Меркурия* | |
| Изменение абсолютной скорости: $\Delta v = \frac{A_v\left(\sin 90^\circ - \sin 270^\circ\right)}{v_s} = 0,384$ с ускорением по (2) $\Delta v/\Delta T$ = 2,5263 см/с² | $\Delta v_f = \frac{v_p - v_a}{v_m} = 0,4$ где $v_p$, $v_a$ – скорость планеты в перигелии и афелии, $v_a$ = 1,5 $v_p$; $v_m = \frac{v_p + v_a}{2} = 0,4$ | $\Delta = \frac{\Delta v_f - \Delta v}{\Delta v_f} 100\,\% = \frac{0,4 - 0,38}{0,4} 100\,\% = 4\,\%$ |
| Ускорение, создаваемое Солнцем: $a$ = 3,99 см/с² с учетом того, что 48 км/с – орбитальная скорость Меркурия | | |
| | *Для Марса* | |
| $\Delta v$ = 0,1928 с ускорением по (2) $\Delta v/\Delta T$ = 0,1633 см/с² | $\Delta v_f = \frac{v_{max} - v_{min}}{v_m} = 0,1867$ | $\Delta = \frac{\Delta v_f - \Delta v}{v_m} 100\,\% = \frac{0,1928 - 0,1867}{0,1928} 100\,\% = 3,16\,\%$ |
| Ускорение, создаваемое Солнцем: $a$ = 0,2578 | | |

где $F_1$ – приливная сила, создаваемая Луной; $F_2$ – сила, создаваемая магнитным полем Земли (МПЗ); $F_3$ – сила трения между дном океана и океанской водой; $F_4$ – сила Кориолиса.

Ньютон показал, что приливы и отливы обусловлены неравномерным притяжением воды в океане со стороны Луны $F_1$. Луна и Земля вместе вращаются вокруг общего центра масс $R_1$, который согласно равенству $R_1M_1 = R_2M_2$ находится на расстоянии примерно 4740 км от центра Земли, где $M_1$, $M_2$ – соответственно масса Земли и Луны; $R_1$, $R_2$ – расстояния от общего центра масс до центра Земли и Луны соответственно (рис. 7). Когда Земля притягивает Луну и в свою очередь Луна также притягивает Землю с равной и противоположно направленной силой (третий закон Ньютона), возникает сила $M_1v^2/R_1$, вызывающая движение Земли вокруг общего центра масс с периодом, равным одному месяцу. Луна движется по своей орбите вокруг общего центра, совершая полный оборот за месяц.

Дополнительное ускорение Земли, создаваемой Луной, имеет следующее значение:

$$a = \frac{M_2}{M_1 + M_2} \cdot \frac{R}{T^2}; R = R_1 + R_2,$$

где $R$ – расстояние от центра Луны до центра Земли. Этот по сравнению с ускорением силы тяжести Земли «ничтожный» эффект является причиной мощных приливных волн. Он ежесуточно создает $10^{15}$ Дж кинетической энергии, перемещая огромные массы воды. Следовательно, приливная сила Луны $F_1$ создает дополнительное ускорение, противоположное абсолютному ускорению Земли, рассчитанное по формуле (2). Сила $F_2$, создаваемая МПЗ, связана с магнитным полем, находящимся в ядре Земли, состоящим из корпускул (протонов, электронов и некоторых тяжелых ядер, таких как кальций, железо и т. д.) и порождающим высоко в земной атмосфере электрические токи. При этом заряженные частицы движутся к полюсам и вращаются там по окружности под действием сил Лоренца:

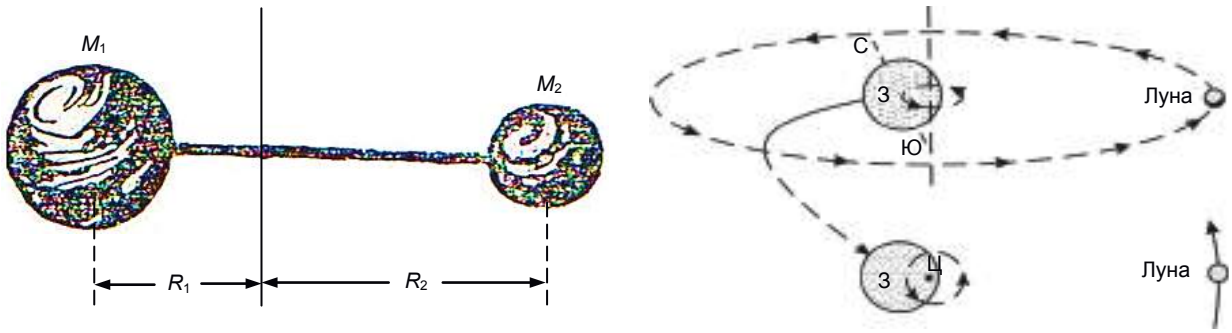



**Рисунок 7. Вращение Земли и Луны вокруг общего центра масс.**
**Figure 7. The revolution of the Earth and the Moon around a common center of gravity.**

$$F_2 = qv^{\star}B \sin \alpha, \quad (4)$$

где $q$, $v^{\star}$ – соответственно заряд и скорость отдельных частиц; $B$ – модуль магнитной индукции.

В результате взаимодействия этих токов с нормальным МПЗ возникает изменение геомагнитного поля, которое, в свою очередь, индуцирует электрические токи. А по закону Ленца индукционный ток всегда имеет такое направление, при котором его магнитное поле противодействует изменению магнитного потока, вызывающего этот ток. Другими словами, $F_2$ имеет противоположное направление к изменению $v_{ab}$ Земли ($v_{ab}^{e}$). Это и есть одна из причин, приводящих к неточности предложенной модели (1) при описании движения Земли.

Как известно, вращение Земли вокруг ее оси создало экваториальную выпуклость и заставило Землю принять форму, более близкую к сплюснутому сфероиду, чем к сфере. Гравитационное притяжение удаленным объектом и сплюснутым сфероидом несколько отличается от притяжения между таким объектом и сферой. Экваториальный выступ наклонен к эклиптике на 23,5° (рис. 6). Когда Луна притягивает к себе экваториальную выпуклость между дном океана и океанской водой, тогда возникают силы трения [27]:

$$F_3 = F_f = \mu S \Delta v / \Delta l, \quad (5)$$

где μ – внутреннее трение; $S$ – площадь соприкосновения слоев; $\Delta v/\Delta l$ – градиент скорости, перпендикулярной к направлению $S$. Это приводит к торможению вращения Земли, и со временем сутки удлиняются. Было время, когда продолжение суток составляло всего 5–6 ч. Этот фактор также направлен противоположно к абсолютному ускорению Земли, определяемому по формуле (2).

При вращении вокруг своей оси и орбитальном движении Земля подвергается силе Кориолиса $F_4$ [28]:

$$F_4 = 4\pi n v_q m_з, \quad (6)$$

где $n$ – число оборотов, совершающихся системой (Землей) за единицу времени; $v_q$ – скорость, перпендикулярная оси вращения, подобно градиенту скорости $\Delta v/\Delta l$ в формуле (5). Сила Кориолиса всегда направлена против вращения и орбитального движения Земли и, следовательно, приводит к изменению $v$, определяемой по формуле (1).

Из изложенного следует, что тектоническое движение ЗК (или плит) тесно связано с ускоренным движением Земли, определяемым по формулам (1)–(6). Поскольку, как видно из рис. 6, от точки осеннего равноденствия до точки зимы движение Земли ускоряется и, следовательно, тектонические плиты и ядро Земли по инерции будут двигаться назад (против движения), а от точки зимы до точки весеннего равноденствия движение Земли замедляется и, следовательно, происходит обратный процесс, плиты и ядро по инерции двигаются вперед и таким образом происходит колебательное движение ЗК (или тектонических плит) и ядра с периодом 1 год. В связи с этим можно перечислить работы некоторых авторов [25, 26, 29, 30], утверждающих, что внутренне ядро никогда не бывает в геометрическом центре Земли и совершает пульсирующее движение вблизи него по некоторой замкнутой орбите. Полученные результаты [24] по движению ядра составлены наравне с известными фактами нестабильностей вращения Земли. Показано, что эти факты не противоречат друг другу.

Однако в перечисленных работах не указывается причина смещения ядра, а показывается только следствие приложенной силы, т. е. влияние последнего на изменение давления и деформации ЗК, способствующее возникновению АСП. Причем предложенная нами модель движения ядра подтверждается данными, приведенными в работе [29].

Как известно, наша Галактика (Млечный Путь) является членом «местной группы», которые хотя и отделены друг от друга сотнями тысяч парсеков (1 пк = 3,086 · $10^{18}$ см), образуют небольшое скопление и вращаются вокруг общего центра (черной дыры) со скоростью 500 км/с [25].

Если учесть, что 99 % массы Солнечной системы сосредоточено в Солнце и масса Солнца составляет 1,99 · $10^{33}$ г, расстояние его от центра Галактики равно 8000 парсеков и постоянная тяготения $G$ = 6,67 × $10^{-8}$ дин × см$^2$ × г$^2$), тогда ускорение, создаваемое центром нашей Галактики на Солнце, будет составлять, см/с$^2$:

$$a = G\frac{m_Г}{r_Г^2} = G\frac{2\cdot 10^{11} m_С}{r_Г} = 0{,}11\cdot 10^{-6},$$

где $r_Г$ – расстояние от центра Галактики до Солнца, см; $m_Г$, $m_С$ – масса центра нашей Галактики и Солнца соответственно.

Кроме этого, солнечная система (СС) получает дополнительное ускорение, связанное с вращением нашей Галактики вокруг общего центра Галактик со скоростью 500 км/с. Абсолютная скорость СС будет рассчитываться уравнением, подобным уравнению (1), отличающимся тем, что в предложенном уравнении учитывается скорость движения Галактики, т. е.

$$v^{*} = v_Г + A_С \sin \alpha = v_Г + (v - A_Г \sin \alpha) \sin \alpha,$$

где $v_Г$ – скорость Галактики, $A_С$ – амплитуда орбитальной скорости Солнца (Солнечной системы); $v_{ab}^{*}$ – абсолютная скорость движения планет с учетом скорости движения нашей Галактики. Геометрическая интерпретация данной модели представлена на рис. 8.

В положении $A$ и $A_1$ абсолютная скорость движения Солнца равна скорости движения Галактики. В точке $B$ абсолютная скорость движения Солнца $v_С$ $v_c$= 250 + 500 = 750 км/с, а точке $B_1$ $v_С$ = 500–250 = 250 км/с. Следовательно, в первой половине орбитального движения Солнце получает положительное ускорение, его скорость движения изменяется по синусоидальному закону и в точке $B$ (sin α = 1) достигает своего максимального значения (750 км/с), при этом абсолютная скорость движения Земли изменяется в пределах 750 + 30 и 750–30 км/с. Во второй половине направление

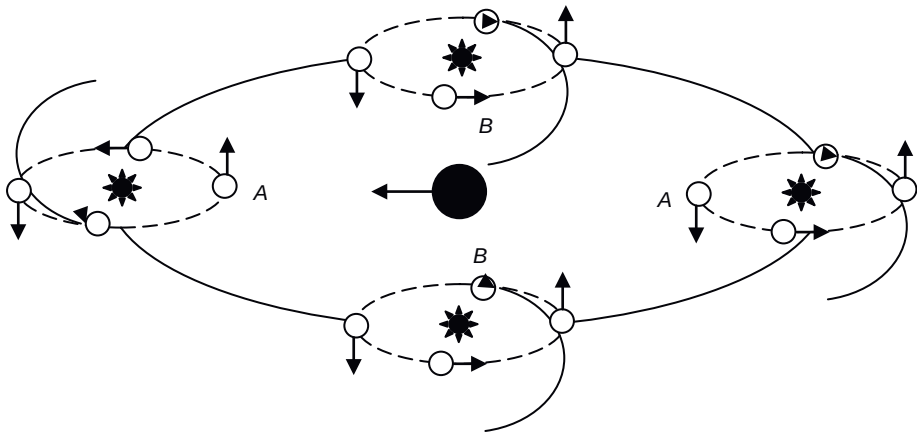



**Рисунок 8. Схема вращения Солнечной системы (Солнце–Земля) вокруг центра нашей Галактики.**
**Figure 8. The scheme of circulation of the Solar system (Sun – Earth) around the center of our Galaxy.**

орбитального движения Солнца будет противоположно направлению движения центра нашей Галактики, и при этом в точке $B_1$ ее скорость будет минимальной ($\sin \alpha = -1$) и равна 250 км/с. А абсолютная скорость движения планеты Земля будет меняться в интервале 250 + 30 и 250–30. Таким образом, изменение скорости движения планеты от минимального значения 220 км/с до максимального значения 780 км/с и наоборот создает силы, двигающие тектонические плиты, причем в первой половине (от точки $A_1$ до точки $A$) должен происходить спрединг ТП, а во второй половине (от точки $A$ до точки $A_1$) должен происходить процесс сближения (коллизия или субдукция) плит.

## Заключение

В результате комплексного исследования выявлено, что одним из главных факторов, провоцирующих движение ТП и ядро Земли, является ускоренное орбитальное движение Земли относительно центра нашей Галактики. При этом происходит передача огромного количества движения в горизонтальном направлении, приводящая к деформации (растяжение и сжатие) земной коры и повышению вероятности возникновения землетрясений в сейсмоактивных (дислокационных) зонах. Предложена идентификация (математическая модель) силы тектонического движения земной коры. Показано, что предложенная модель адекватно описывает ускоренное орбитальное движение планет Меркурия и Марса. При описании орбитального движения Земли учитываются дополнительные силы, такие как приливные силы, сила, создаваемая магнитным полем Земли, сила трения между дном океана и океанской водой, сила Кориолиса. Полученные нами результаты подтверждены современными данными других авторов. Показано, что сила, движущая тектонические плиты, имеет космогенную природу.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Вегенер А. Происхождение материков и океанов: пер с нем. Л.: Наука, 1984. 285 с.
2. Лобковский Л. И., Никитин А. М., Хаин В. Е. Современные проблемы геотектоники и геодинамики. М.: Научный мир, 2004. 12 с.
3. Мельников О. А. Ротационный режим Земли – отправной пункт и основа численного и физического моделирования в любых геологических процессах // Тектоника и геодинамика континентальной литосферы: материалы совещ. М., 2003. Т. 2. С. 40–44.
4. Тарасенко Г. В. Происхождение нефти, тектоника плит и их будущее // Нефть, газ и бизнес. 2003. № 4. С. 36–39.
5. Викулин А. В., Тверитинова Т. Ю. О скоростях движения тектонических плит. С. 1–10. URL: http://www.kscnet.ru/ivs/publication/whirlwinds/viktver.htm
6. Уруцкоев Л. И., Ликсонов В. И., Циноев В. Г. Экспериментальное обнаружение «странного» излучения и трансформации химических элементов // Прикладная физика. 2000. № 2. С. 1–23.
7. Викулин А. В., Иванчин А. Г. Ротационная модель сейсмического процесса // Тихоокеанская геология. 1998. Т. 17, № 6. С. 95–103.
8. Трубицын В. П. Роль плавающих континентов в глобальной тектонике Земли // Физика Земли. 1998. № 4. С. 20–31.
9. Артюшков Е. В. Образование сверхглубокого Северо-Чукотского прогиба вследствие экологитизации нижней части континентальной коры // Геология и геофизика, 2010. Т. 51, №1. С. 61–74.
10. Artyushkov E. V. Role of crustal stretching in subsidence of continental crust // Tectonophysics. 1992. Vol. 251. P. 187–215. https://doi.org/10.1016/0040-1951(92)90081-G
11. Cloetingh S., McQueen H., Lambeck K. On a tectonic mechanism for regional sea level variations // Earth Planet. Sci. Lett. 1985. Vol. 51. P. 139–162. https://doi.org/10.1016/0012-821X(85)90098-6
12. Nikishin A. M., Ziegler P. A., Stephenson R. A., Cloetingh S. A. P. L., Furne A. V., Fokin P. A., Ershov A. V., Bolotov S. N., Korotaev M. V., Alekseev A. S., Gorbachev V. I., Shipilov E. V., Lankreijer A., Bembinova E. Yu., Shalimov I. V. Late Precambrian to Triassic history of the East European Craton: dynamics of sedimentary basin evolution // Tectonophysics. 1996. Vol. 268. P. 23–63. https://doi.org/10.1016/S0040-1951(96)00228-4
13. Watts A. B. Isostasy and flexure of the lithosphere. N. Y.; Melbourne: Cambridge University Press, 2001. 458 p. ISBN 0-521-62272-7.
14. Brunet M. F., Volozh Y. A., Antipov M. P., Lobkovsky L. I. The geodynamic evolution of the Precaspian basin (Kazakhstan) along a north-south section // Tectonophysics. 1999. Vol. 313. P. 85–106. https://doi.org/10.1016/S0040-1951(99)00191-2
15. Grantz A., May S. D., Hart P. E. Geology of the Arctic continental margin of Alaska // The North America. V. L. The Arctic Ocean region, The Geological Society of America. 1990. P. 257–286.
16. Rodkin M. V., Tikhonov I. V. The typical seismic behavior in the vicinity of a large earthquake // Physics and Chemistry of the Earth. 2016. Vol. 95. P. 73–84. https://doi.org/10.1016/j.pce.2016.04.001
17. Stuart Crampin, Yuan Gao, Julian Bukits. A review of retrospective stress-forecasts of earth quakes and eruptions // Physics of Earth and Planetary interiors. 2015. Vol. 245. P. 76–87. https://doi.org/10.1016/j.pepi.2015.05.008
18. Кукал З. Скорость геологических процессов. М.: Мир, 1987. 246 с.
19. Гатинский Ю. Г., Рундквист Д. В., Владова Г. В., Мирлин Е. Г., Миронов Ю. В., Рожкова В. В., Соловьев А. А. Зоны субдукции: действующие силы, геодинамические типы, сейсмичность и металлогения // Вестник ОГГГГН РАН: электр. журнал. 2000. Т. 1. № 2-1(12).
20. Касахара К. Механика землетрясений: пер. с англ. М.: Мир. 1985. 264 с.

21. Стефанов Ю. П. Некоторые нелинейные эффекты поведения горных пород // Физическая механика. 2016. № 6. С. 54–61. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=27519087
22. Рзаев А. Г., Расулов С. Р. Interaction mechanism of rock with deep water // Изв. УГГУ. 2018. № 3. Р. 89–97. https://doi.org/10.21440/2307-2091-2018-3-89-97
23. Куксенко В. С., Махмудов Х. Ф. Экспериментальное и теоретическое изучение актов трещинообразования в гетерогенных материалах // Геология и геофизика. 2017. Т. 58, № 6. С. 915–923. https://doi.org/10.15372/GiG20170607
24. Малышков Ю. П., Малышков С. Ю. Периодические вариации геофизических полей и сейсмичности, их возможная связь с движением ядра Земли // Геология и геофизика. 2009. Т. 50, № 2. С. 152–172. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=11751877
25. Струве О., Линдс Б., Пилланс Э. Элементарная астрономия. М.: Наука, 1967. 487 с.
26. Антонов В. А., Кондратьев В. П. К вопросу о величине смещения внутреннего ядра Земли // Физика Земли. 2004. № 4. С. 63–66. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=17699062
27. Касаткин А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. М.: ГНТИ химической литературы, 1960. 829 с.
28. Ландау Д. Д., Китайгородский А. И. Физические тела. М.: Наука, 1978. 206 с.
29. Авсюк Ю. Н., Адушкин В. В., Овчинников В. М. Комплексное исследование подвижности внутреннего ядра Земли // Физика Земли. 2001. № 8. С. 64–75.
30. Коровяков Н. И., Никитин А. Н. Закономерность эксцентрического вращения ядра и оболочки Земли в суточном и годовом периоде // Сознание и физическая реальность. 1988. Т. 3, № 2. С. 23–30.

*Статья поступила в редакцию 10 декабря 2018 г.*

УДК 551.24 https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-1-103-114

# Identification of the mechanism of tectonic movements of the Earth's crust

**Abbas Geydar ogly RZAYEV**[1, 2*],
**Sakit Rauf ogly RASULOV**[2,**]

[1]Institute of Control System of ANAS, Baku, Republic of Azerbaijan
[2]Azerbaijan State Oil and Industry University, Baku, Republic of Azerbaijan

**Relevance.** Earthquakes occur in the space of tectonic plates during their mutual (relative) movement in the lithosphere. At the same time, depending on the situation, subduction, collision and plates spreading, which lead to the accumulation of stress to a value exceeding the stability of the rock and the occurrence of an earthquake. However, nowadays, there is no clear idea about the nature of the force moving the lithospheric plates of the earth's crust. It is believed that the horizontal movement of plates occurs due to the mantle heat and gravitational flows – convection. The source of energy for these flows is the temperature difference between the temperature of the central zones of the Earth and the temperature of its surface. However, this hypothesis cannot explain the process of spreading between the plates. Along with endogenous forces, exogenous (cosmogenic) forces most significantly influence plate movement. Consequently, determination and mathematical description of the nature and characteristics of these forces is an urgent task. This paper is devoted to this task.
**Purpose of the work:** The mathematical description of the accelerated Earth's revolution around the Sun and around the center of our Galaxy leading to the oscillatory motion of lithospheric plates.
**Research methodology.** The authors used methods of mathematical modeling, the theory of movement of crustal blocks and continental drift, the laws of mechanics and the orbital movement of the Earth around the Sun and the Solar System around the center of our Galaxy.
**Results.** Mathematical models of the process of accelerated orbital movement of the Earth around the Sun and the center of our Galaxy have been developed taking into account a tidal force, the force created by the Earth's magnetic field (Lorentz force), the friction force between the ocean floor and ocean water, and the Coriolis force. It is shown that the proposed models with a relative error of 4% properly describe the orbital movement of Mercury and Mars around the Sun.
**Conclusions.** As a result of a comprehensive study, it was revealed that one of the main factors forcing tectonic plates to move is the accelerated orbital motion of the Earth relative to the center of our Galaxy. In this case, a huge amount of movement occurs in the horizontal direction leading to deformation (extension and compression) of the Earth's crust and an increase in the probability of earthquakes occurrence in seismic (dislocation) zones. A mathematical model of the force of tectonic movement of the earth's crust is proposed. It is shown that the model properly describes the accelerated orbital movement of Mercury and Mars. When describing the orbital movement of the Earth, additional forces are taken into account, such as a tidal force, the force created by the Earth's magnetic field, friction between the ocean floor and ocean water, and the Coriolis force. It is shown that the force moving the tectonic plates has a cosmogenic nature.

*Keywords:* tectonic plates, global tectonics, earthquake, core, mantle, asthenosphere.

## REFERENCES

1. Wegener A. 1984, The origin of the continents and oceans: translated from German, 285 p.
2. Lobkovsky L. I., Nikitin A. M., Khain V. E. 2004, *Sovremennyye problemy geotektoniki i geodinamiki* [Modern problems of geotectonics and geodynamics]. Moscow, 12 p.
3. Melnikov O. A. 2003, *Rotatsionnyy rezhim Zemli – otpravnoy punkt i osnova chislennogo i fizicheskogo modelirovaniya v lyubykh geologicheskikh protsessakh* [The rotational regime of the Earth is the starting point and the basis of numerical and physical modeling in any geological processes]. Tectonics and geodynamics of the continental lithosphere: proceedings of meetings. Moscow, vol. 2, pp. 40–44.
4. Tarasenko G. V. 2003, The origin of oil, plate tectonics and their future. *Neft', gaz i biznes* [Oil, gas and business], No 4, pp. 36–39. (*In Russ.*)
5. Vikulin A. V., Tveritinova T. Yu. *O skorostyakh dvizheniya tektonicheskikh plit* [About the speeds of tectonic plates], pp. 1–10. http://www.kscnet.ru/ivs/publication/whirlwinds/viktver.htm
6. Urutskoev L. I., Liksonov V. I., Tsinoev V. G. 2000, Experimental detection of "strange" radiation and transformation of chemical elements. *Prikladnaya Fizika* [Applied Physics], no. 2, pp. 1–23. (*In Russ.*)
7. Vikulin A. V., Ivanchin A. G. 1998, Rotational model of the seismic process. *Tikhookeanskaya Geologiya* [Russian Journal of Pacific Geology], vol. 17, no. 6, pp. 95–103. (*In Russ.*)
8. Trubitsyn V. P. 1998, The role of floating continents in the global Earth tectonics. *Fizika Zemli* [Physics of the Earth], no. 4, pp. 20–31. (*In Russ.*)
9. Artyushkov E. V. 2010, Formation of superdeep North-Chukotski downfold due to ecologization of the lower continental crust. *Geologiya i geofizika* [Geology and Geophysics], vol. 51, no. 1, pp. 61–74. (*In Russ.*)
10. Artyushkov E. V. 1992, Role of crustal stretching in subsidence of continental crust. *Tectonophysics*, vol. 251, pp. 187–215. https://doi.org/10.1016/0040-1951(92)90081-G
11. Cloetingh S., McQueen H., Lambeck K. 1985, On a tectonic mechanism for regional sea level variations. *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 51, pp. 139–162. https://doi.org/10.1016/0012-821X(85)90098-6
12. Nikishin A. M., Ziegler P. A., Stephenson R. A., Cloetingh S. A. P. L., Furne A. V., Fokin P. A., Ershov A. V., Bolotov S. N., Korotaev M. V., Alekseev A. S., Gorbachev V. I., Shipilov E. V., Lankreijer A., Bembinova E. Yu., Shalimov I. V. 1996, Late Precambrian to Triassic history of the East European Craton: dynamics of sedimentary basin evolution. *Tectonophysics*, vol. 268, pp. 23–63. https://doi.org/10.1016/S0040-1951(96)00228-4
13. Watts A. B. 2001, Isostasy and flexure of the lithosphere. N. Y.; Melbourne: Cambridge University Press, 458 p.
14. Brunet M. F., Volozh Y. A., Antipov M. P., Lobkovsky L. I. 1999, The geodynamic evolution of the Precaspian basin (Kazakhstan) along a north-south section. *Tectonophysics*, vol. 313, pp. 85–106. https://doi.org/10.1016/S0040-1951(99)00191-2
15. Grantz A., May S. D., Hart P. E. 1990, Geology of the Arctic continental margin of Alaska. The North America. V. L. The Arctic Ocean region, The Geological Society of America, pp. 257–286.
16. Rodkin M. V., Tikhonov I. V. 2016, The typical seismic behavior in the vicinity of a large earthquake. *Physics and Chemistry of the Earth*, vol. 95, pp. 73–84. https://doi.org/10.1016/j.pce.2016.04.001
17. Stuart Crampin, Yuan Gao, Julian Bukits. 2015, A review of retrospective stress-forecasts of earth quakes and eruptions. *Physics of Earth and Planetary interiors*, vol. 245, pp. 76–87. https://doi.org/10.1016/j.pepi.2015.05.008

*abbas_r@mail.ru
https://orcid.org/0000-0003-2286-1074
** rasulovsakit@gmail.com
https://orcid.org/0000-0002-1548-3143

18. Kukal Z. 1987, *Skorost' geologicheskikh protsessov* [Speed of geological processes]. Moscow, 246 p.
19. Gatinsky Yu. G., Rundkvist D. V., Vladova G. V., Mirlin E. G., Mironov Yu. V., Rozhkova V. V., Soloviev A. A. 2000, Subduction zones: acting forces, geodynamic types, seismicity and metallogeny. *Vestnik Otdeleniya geologii, geofiziki, geokhimii i gornykh nauk Rossiyskoy Akademii nauk* [Bulletin of the Department of Geology, Geophysics, Geochemistry and Mining Sciences of the Russian Academy of Sciences], electronic journal, vol.1, no. 2-1 (12). (*In Russ*.)
20. Kasahara K. 1985, Earthquake mechanics: translated from English. Moscow, 264 p.
21. Stefanov Yu. P. 2016, Some nonlinear effects of rock behavior. *Fizicheskaya mekhanika* [Physical mechanics], no. 6, pp. 54–61. (*In Russ*.) https://elibrary.ru/item.asp?id=27519087
22. Rzayev A. G., Rasulov S. R. 2018, Interaction mechanism of rock with deep water. *News of the Ural State Mining University*, no. 3, pp. 89–97. https://doi.org/10.21440/2307-2091-2018-3-89-97
23. Kusenko V. S., Makhmudov Kh. F. 2017, Experimental and theoretical study of cracking in heterogeneous materials. *Geologiya i geofizika* [Geology and Geophysics], vol. 58, no. 6, pp. 915–923. (*In Russ*.) https://doi.org/10.15372/GiG20170607
24. Malyshkov Yu. P., Malyshkov S. Yu. 2009, Periodic variations of geophysical fields and seismicity, their possible connection with the movement of the Earth's core. *Geologiya i geofizika* [Geology and Geophysics], vol. 50, no. 2, pp. 152–172. (*In Russ*.) https://elibrary.ru/item.asp?id=11751877
25. Struve O., Lynds B., Pillans E. 1967, Elementary astronomy. Moscow, 487 p.
26. Antonov V. A., Kondratyev V. P. 2004, On the question of magnitude of displacement of the inner core of the Earth. *Fizika Zemli* [Physics of the Solid Earth], no. 4, pp. 63–66. https://elibrary.ru/item.asp?id=17699062
27. Kasatkin A. G. 1960, *Osnovnyye protsessy i apparaty khimicheskoy tekhnologii* [Basic processes and chemical technology equipments]. Moscow, 829 p.
28. Landau D. D., Kitaigorodsky A. I. 1978, *Fizicheskiye tela* [Physical bodies]. Moscow, 206 p.
29. Avsyuk Yu. N., Adushkin V. V., Ovchinnikov V. M. 2001, Complex study of the mobility of the inner core of the Earth. *Fizika Zemli* [Physics of the Solid Earth], no. 8, pp. 64–75. (*In Russ*.)
30. Korovyakov N. I., Nikitin A. N. 1988, The pattern of eccentric rotation of the core and the shell of the Earth in the diurnal and annual period. *Soznaniye i fizicheskaya real'nost'* [Consciousness and physical reality], vol. 3, no. 2, pp. 23–30. (*In Russ*.)

*The article was received on December 10, 2018*

*Известия Уральского государственного горного университета. 2019. Вып. 1(53). С. 115-120*

УДК 622.03 https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-1-115-120

# Исследование реологических свойств каменной соли

**Валерий Александрович АГЕЕНКО***

Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Россия, Москва

***Актуальность.*** Методы определения устойчивости при длительной эксплуатации подземных резервуаров, созданных путем выщелачивания, пока не отражают всего многообразия влияющих на них факторов, поэтому не только геометрические параметры выработок, но и минимальное допускаемое давление хранимого продукта принимаются со значительным запасом. Создание надежных методов определения основных параметров подземных резервуаров связано с изучением физико-механических свойств соляных пород. В связи с тем, что галогенные породы даже при минимальном механическом воздействии проявляют пластические свойства, применимость к ним существующих стандартизированных методов определений различных механических свойств, по нашему мнению, носит дискуссионный характер. Это подтверждается и тем обстоятельством, что в России до сих пор нет методики федерального уровня по определению реологических и пластических свойств соляных горных пород. В связи с этим выбор методики проведения экспериментов по определению реологических свойств является проблематичным.
***Целью исследования*** являются проведение экспериментов и проверка нового метода прогноза кривых ползучести.
***Методы и результаты.*** В работе внимание уделено уникальности экспериментальных определений реологических свойств соляных горных пород. Описаны методики проведения экспериментов. Большое внимание уделено изучению необходимой продолжительности эксперимента по определению реологических характеристик. Выявлены закономерности при кривых ползучести в зависимости от времени эксперимента и предложено необходимое время проведения эксперимента. Описан метод прогнозирования кривой ползучести на 300 ч по первым 60 мин ползучести. Данная методика описания является новой в сравнении с другими, родственными исследования по данной тематике. Накопленный опыт экспериментальных данных дает основание для разработки стандарта организации по определению комплекса физико-механических свойств галогенных пород. Описанные эксперименты по испытанию были опробованы ООО «Газпром геотехнологии».
***Выводом*** данной работы является новый предложенный метод прогнозирования эксперимента по первым 40 мин ползучести.

*Ключевые слова*: испытание каменной соли, кривые ползучести, режим нагружения, экспериментальная кривая ползучести, время проведения эксперимента, геомеханика.

## Введение

Каменная соль под нагрузкой с течением времени имеет особенность изменять свои прочностные характеристики. Во многом это связано с изменением напряжений в массиве [1]. Напряженно-деформированное состояние с течением времени изменяется, так как у соли хорошо прослеживаются реологические свойства. Основными реологическими характеристиками являются предел длительной прочности и реологические кривые [2].

## Экспериментальные данные

Для исследования одноосной ползучести и определения предела длительной прочности по методике Е. М. Шафаренко производились эксперименты с постоянным напряжением на протяжении 300 ч [3]. Напряжения выбирались равными 9, 12, 15 и 18 МПа. Результаты ползучести представлены на рис. 1.

Для описания линий ползучести применялось уравнение логарифмической кривой, это позволяло избегать погрешности [4] датчика при расчете скорости ползучести на установившемся участке ползучести, доли ед.:

$$e_1 = a + b \lg (t),$$

где $a$, $b$ – параметры уравнения; $t$ – время, ч.

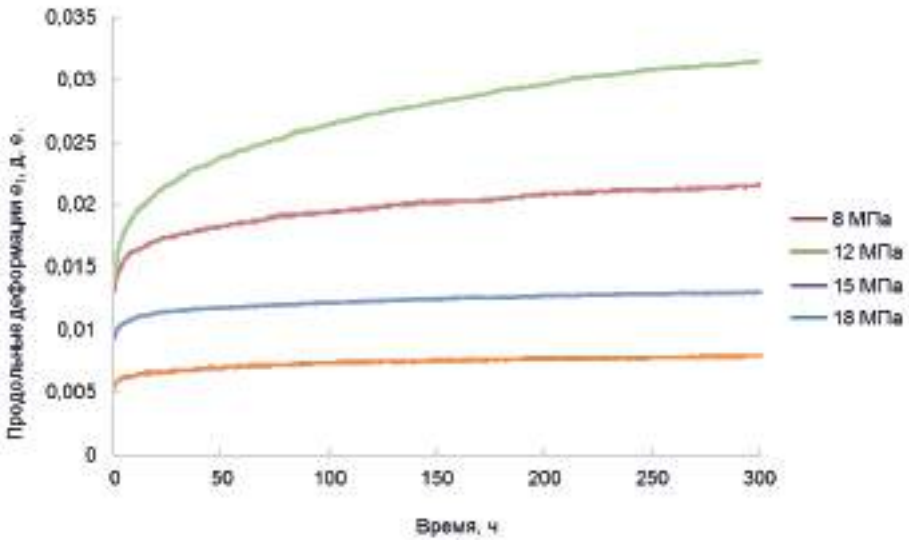



**Рисунок 1. Кривые ползучести каменной соли.**
**Figure 1. Creep curves of salt rock.**

* valera.ageenko@mail.ru
https://orcid.org/0000-0001-7190-964X

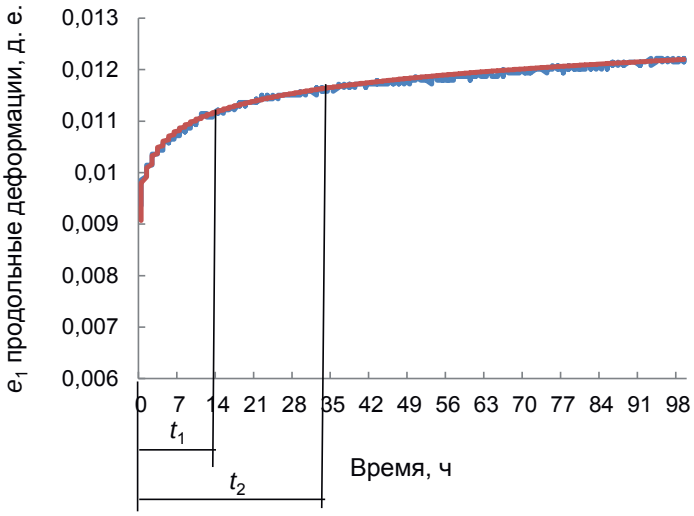



**Рисунок 2. Участки отбора времени ползучести.**
**Figure 2. Sites for time selection of creeping.**

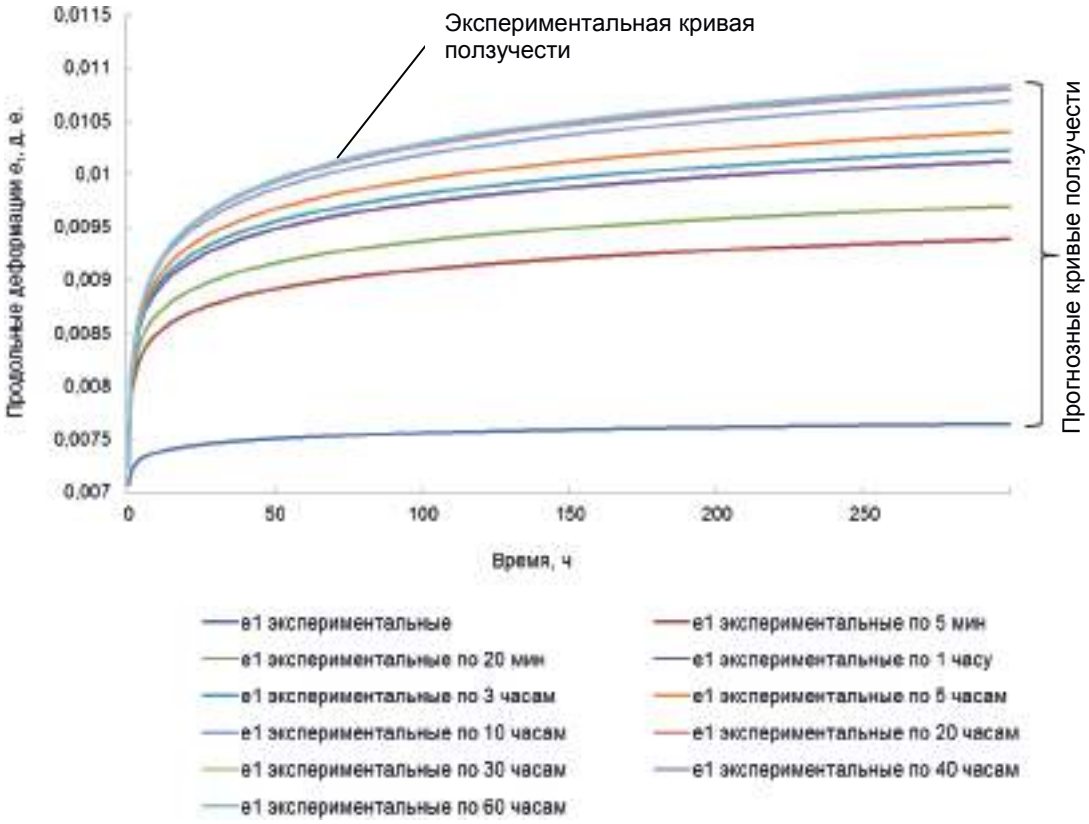



**Рисунок 3. Графики расчётных кривых ползучести и экспериментальная кривая.**
**Figure 3. Graphs of calculated creep curves and an experimental curve.**

### Предлагаемая методика прогнозирования эксперимента

В связи с производственной необходимостью [5] была поставлена задача изучить минимальное время ползучести для построения прогнозной кривой. Для этого строились прогнозные кривые ползучести по логарифмическому уравнению [6]. Коэффициент корреляции при описании был не ниже 0,98.

На начальном участке ползучести выбиралось время от 5 до 100 мин и строилась прогнозная кривая ползучести на 300 ч для сравнения с экспериментальной кривой. На рис. 2 показаны участки отбора времени для прогноза.

Время $t_i$, по которому строились прогнозные кривые ползучести, выбиралось следующее: 5 мин, 20 мин, 1 ч, 3 ч, 5 ч, 10 ч, 20 ч, 30 ч, 40 ч и 60 ч.

### Сопоставление экспериментальных и прогнозных кривых ползучести

На основании выбранного времени по уравнению, доли ед.,

$$e_1 = a + b \lg (t_i)$$

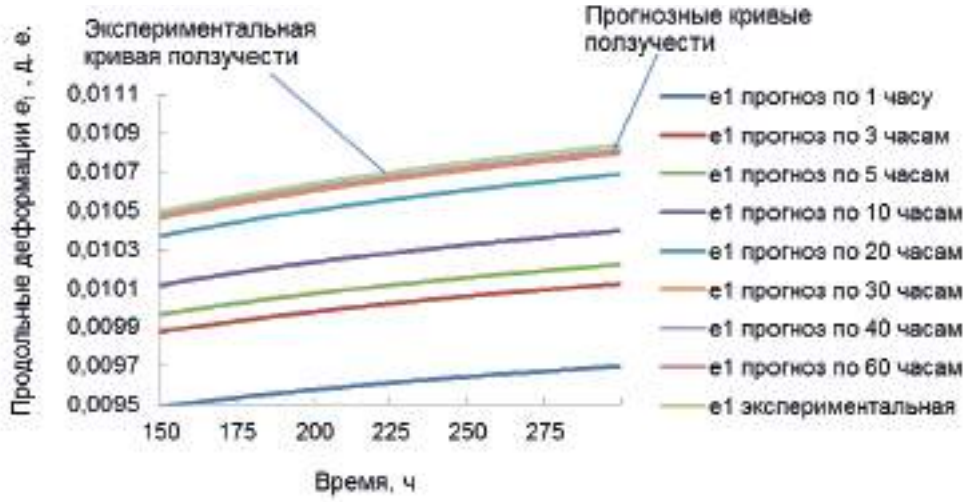



**Рисунок 4. Графики расчётных кривых ползучести и экспериментальная кривая.**
**Figure 4. Graphs of calculated creep curves and an experimental curve.**

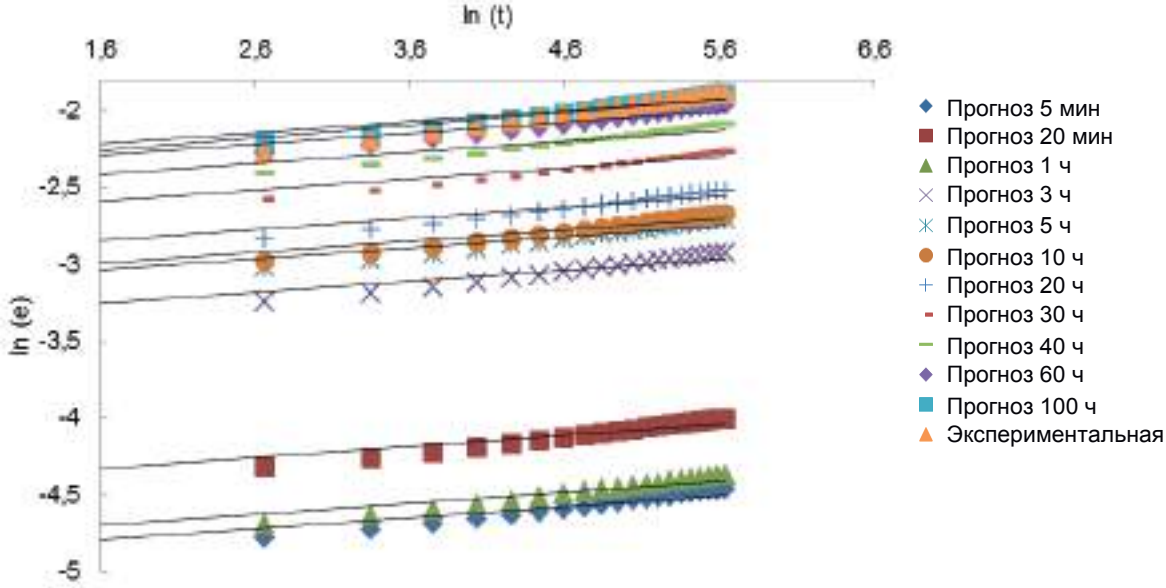



**Рисунок 5. График зависимостей продольных деформаций от времени в логарифмических координатах.**
**Figure 5. Graph of dependences of longitudinal deformations on time in logarithmic coordinates.**

строились прогнозные кривые ползучести и сравнивались с экспериментальными данными ползучести. Результаты представлены на рис. 3.

Из графика видно, что при увеличении времени для прогноза расчетная кривая приближается к экспериментальным данным. Более детально это отражено на рис. 4.

Визуально видно, что наступает такой момент, при котором расчетная кривая ползучести практически совпадает с экспериментальной кривой. По результатам обработки [7] графиков видно, что данное время составляет минимум 40 ч. При увеличении времени картина существенно не меняется. Для того чтобы оценить, как точно экспериментальная кривая совпадает с расчетной кривой, сравнивались коэффициенты зависимости продольных деформаций от времени [8]. Для этого строился график зависимости продольных деформаций от времени в логарифмических координатах и описывался уравнением:

$$\lg(e) = k \lg(t) - b,$$

где $b$ – параметр уравнения.

Полученные графики представлены на рис. 5.

Коэффициенты зависимости продольных деформаций от времени сравнивались в процентном соотношении [9]. Данные представлены в таблице.

Результаты подтверждают, что при достижении времени 40 ч коэффициент изменяется незначительно и количественно отличается от экспериментального не более чем на 5 %.

**Коэффициенты зависимости продольных деформаций расчетных кривых и экспериментальной кривой от времени.**
**The coefficients of dependence on time of longitudinal deformations of the calculated curves and the experimental curve.**

| Время ползучести, выделенное для прогноза | Уравнения прямых | Отклонение, % |
|---|---|---|
| Фактическое | $y = 0{,}0340\,x - 2{,}4002$ | – |
| 100 ч | $y = 0{,}0339\,x - 2{,}5323$ | 0,18 |
| 60 ч | $y = 0{,}0329\,x - 2{,}5888$ | 3,2 |
| 40 ч | $y = 0{,}0325\,x - 2{,}6982$ | 4,3 |
| 30 ч | $y = 0{,}0303\,x - 2{,}8211$ | 15,1 |
| 20 ч | $y = 0{,}0289\,x - 2{,}9611$ | 14,7 |
| 10 ч | $y = 0{,}0271\,x - 3{,}1236$ | 20,1 |
| 5 ч | $y = 0{,}0256\,x - 3{,}3162$ | 30,1 |
| 3 ч | $y = 0{,}0237\,x - 3{,}5531$ | 29,4 |
| 1 ч | $y = 0{,}0228\,x - 4{,}2122$ | 32,8 |
| 20 мин | $y = 0{,}0175\,x - 4{,}2989$ | 48,4 |
| 5 мин | $y = 0{,}0090\,x - 5{,}0659$ | 73,5 |

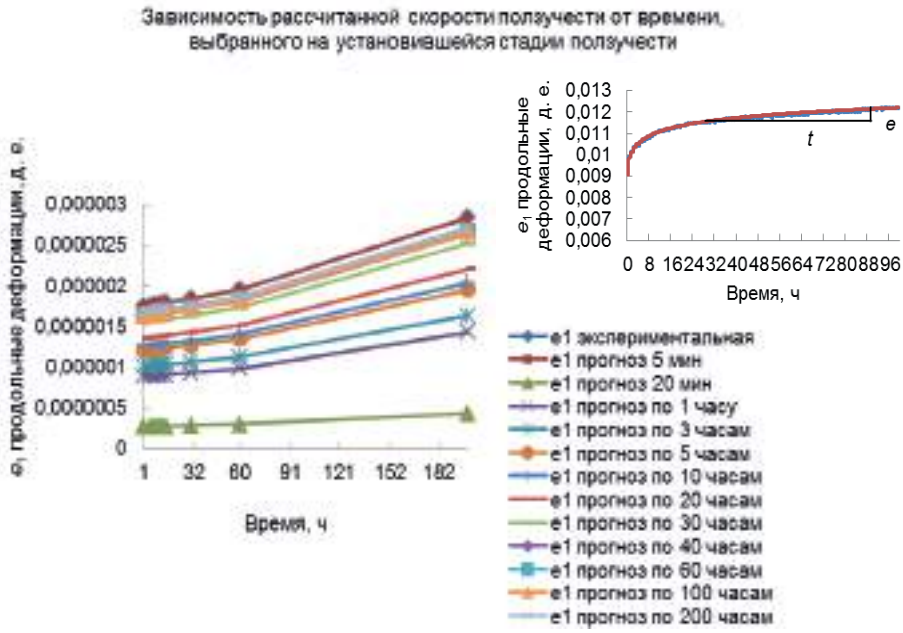
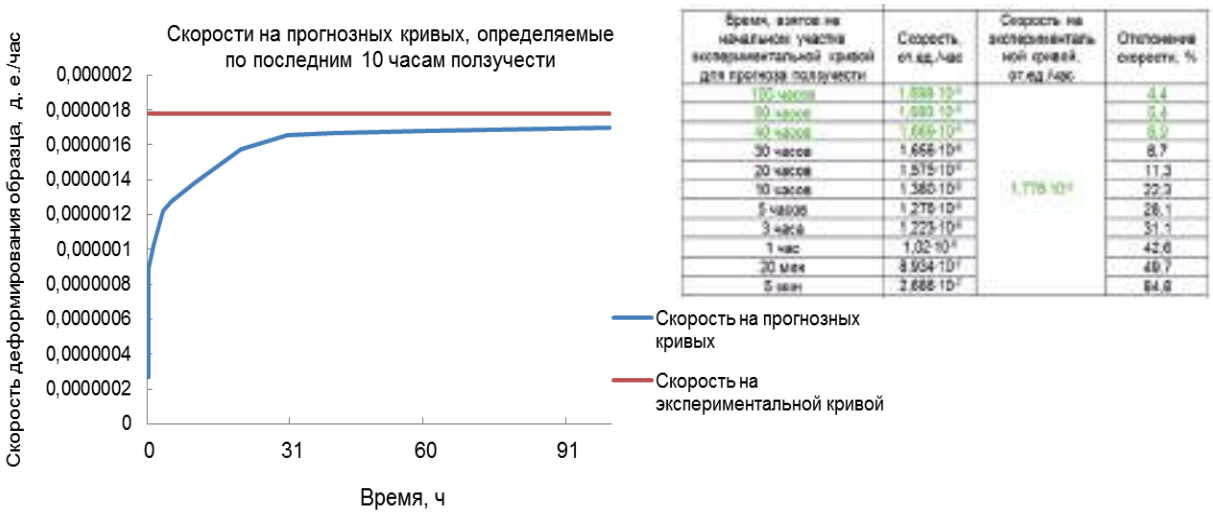



**Рисунок 6. Справа график определения скорости деформирования на экспериментальной кривой ползучести, слева графики скоростей деформирования в зависимости от времени на конечном участке ползучести.**
**Figure 6. On the right hand, there is a graph of determining the strain rate on the experimental creep curve; on the left hand – graphs of the strain rate depending on time on the final creeping zone.**




| Время, взятое на начальном участке экспериментальной кривой для прогноза ползучести | Скорость, от.ед./час | Скорость на экспериментальной кривой, от.ед./час | Отклонение скорости, % |
|---|---|---|---|
| 100 часов | $1{,}889\cdot10^{-6}$ | | 4,4 |
| 80 часов | $1{,}880\cdot10^{-6}$ | | 5,4 |
| 40 часов | $1{,}669\cdot10^{-6}$ | | 6,2 |
| 30 часов | $1{,}656\cdot10^{-6}$ | | 8,7 |
| 20 часов | $1{,}575\cdot10^{-6}$ | | 11,3 |
| 10 часов | $1{,}380\cdot10^{-6}$ | $1{,}778\cdot10^{-6}$ | 22,3 |
| 5 часов | $1{,}278\cdot10^{-6}$ | | 28,1 |
| 3 часа | $1{,}223\cdot10^{-6}$ | | 31,1 |
| 1 час | $1{,}02\cdot10^{-6}$ | | 42,6 |
| 20 мин | $8{,}934\cdot10^{-7}$ | | 49,7 |
| 5 мин | $2{,}688\cdot10^{-7}$ | | 84,9 |

**Рисунок 7. Расчет скорости ползучести на экспериментальной кривой и расчётных кривых.**
**Figure 7. Calculation of creeping rate on the experimental curve and calculated curves.**

Дальнейшие исследования ползучести были направлены на изучение скоростей ползучести на установившейся стадии ползучести [10]. Для этого рассчитывалась скорость на конечном этапе ползучести на ветвях, которые не перешли в стадию прогрессирующей ползучести [11]. Расчет скорости производился по формуле, доли ед./ч:

$$v_i = e_i / t_i,$$

где $t_i$ – время ползучести на конечной стадии ползучести, которое было выбрано для определения скорости [12]; $e_i$ – величина продольных деформаций [13], $e_i = e_{кон} - e_t$; $t_i$ – время по которому производился расчет скорости.

Результаты определения скоростей представлены на рис. 6.

Из графика видно, что до определенного времени, которое составляет около 20 ч, скорость меняется незначительно. Для более точных расчетов было выбрано время расчета скорости на конечном участке ползучести, равное 10 ч. Результаты исследований представлены на рис. 7.

## Выводы

Исследования показывают, что при времени прогноза для ползучести свыше 40 ч скорость меняется незначительно и количественно не превышает 6 % [14]. Все расчетные кривые, у которых время составляет менее 40 ч, скорости сильно отличаются от экспериментальных данных [15].

Можно утверждать, что для прогноза кривой ползучести достаточно 40 ч ползучести.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов А. А., Левицкий Ю. Ф. Геология галогенных отложений (формаций) СССР. М.: Госгеолтехиздат, 1960. 424 с.
2. Хохлов А. В. Кривые длительной прочности нелинейной модели вязкоупругопластичности типа Максвелла и правило суммирования поврежденности при ступенчатом нагружении // Вестник СамГТУ. Сер. «Физико-математические науки». 2016. Т. 20, № 3. С. 524–543.
3. Хохлов А. В. Определяющее соотношение для реологических процессов с известной историей нагружения // Изв. РАН. Механика твердого тела. 2008. № 2. С. 140–160.
4. Димитриенко Ю. И., Юрин Ю. В. Конечно-элементное моделирование напряженно-деформированного состояния горных пород с учетом ползучести // Математическое моделирование и численные методы. 2015. № 3. С. 101–118.
5. Ильинов М. Д., Карташов Ю. М. Ускоренный метод определения реологических свойств горных пород // Записки Горного института. 2011. Т. 190. С. 207–209. Link
6. Hakan Özşen, İhsan Özkan, Cem Şensöğüt. Measurement and mathematical modelling of the creep behaviour of Tuzköy rock salt // International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. 2014. Vol. 66. P. 128–135. https://dx.doi.org/10.1016/j.ijrmms.2014.01.005
7. Yu Zhang, Wei-ya Xu, Jian-fu Shao, Hai-bin Zhao, Wei Wang. Experimental investigation of creep behavior of clastic rock in Xiangjiaba Hydropower Project // Water Science and Engineering. 2015. Vol. 8, issue 1. P. 55–62. https://doi.org/10.1016/j.wse.2015.01.005
8. Агеенко В. А. Разработка алгоритмов компьютерного проектирования наземного пространства в историческом центре Москвы и на присоединенных территориях // ГИАБ. 2012. № 5. С. 358–359.
9. Агеенко В. А., Баклашов И. В. Разработка теории и моделирование процессов сводообразования в окрестности горизонтальной выработки // ГИАБ. 2015. № 12. С. 5–7.
10. Паньков И. Л., Асанов В.А., Ударцев А. А., Кузьминых В. С., Евсеев В. С. Особенности деформирования и разрушения соляных пород // Проблемы безопасности и эффективности освоения георесурсов в современных условиях: материалы науч.-практ. конф. Пермь: Горный ин-т УрО РАН, 2014. С. 304–311.
11. Паньков И. Л., Ударцева А. А. Экспериментальное изучение деформирования соляных пород при ползучести // Геология и полезные ископаемые Западного Урала. 2011. № 11. С. 205–207.
12. Lavrov A. The Kaiser effect in rocks: principles and stress estimation techniques // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2003. Vol. 40, № 2. P. 151–171. https://dx.doi.org/10.1016/S1365-1609(02)00138-7
13. El Hassan Ait Laasri, Es-Said Akhouayri, Dris Agliz, Abderrahman Atmani. Automatic detection and picking of P-wave arrival in locally stationary noise using cross-correlation // Digital Signal Processing. 2014. Vol. 26. P. 87–100. http://dx.doi.org/10.1016/j.dsp.2013.12.009
14. Addair T. G., Dodge D. A., Walter W. R., Ruppert S. D. Large-scale seismic signal analysis with Hadoop // Computers and Geosciences. 2014. Vol. 66. P. 145–154. https://doi.org/10.1016/j.cageo.2014.01.014
15. Yoon C. E., O'Reilly O., Bergen K. J., Beroza G. C. Earthquake detection through computationally efficient similarity search // Science Advances. 2015. Vol. 1, issue 11. e1501057. https://doi.org/10.1126/sciadv.1501057

*Статья поступила в редакцию 16 января 2019 г.*

УДК 622.03 https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-1-115-120

# Study of the rheological properties of salt rock

**Valerii Aleksandrovich AGEENKO***

National University of Science and Technology «MISIS», Moscow, Russia

***Relevance.*** Methods for determining durability during long-term operation of underground reservoirs created by chemical degradation do not cover the diversity of factors affecting them, therefore not only the geometrical parameters of workings, but the minimum allowable pressure of the stored product as well are considered with a significant margin. Creating reliable methods for determining the basic parameters of underground reservoirs is associated with the study of the physical and mechanical properties of salt rocks. Due to the fact that halogen rocks (even with a minimal mechanical effect) exhibit plastic properties, the applicability of the existing standardized methods for determining various mechanical properties to them, in our opinion, is debated. This is confirmed by the fact that there is still no methodology in Russia for determining the rheological and plastic properties of salt rocks. In this regard, the choice of methods of conducting tests to determine rheological properties is problematic.
***The purpose of the study*** is the performance of an experiment and test a new method for predicting creep curves.
***Methods and results.*** This paper focuses on the uniqueness of the experimental determinations of rheological properties of salt rocks. Experimental techniques are described. Much attention is paid to the study of the required duration of the experiment to determine the rheological characteristics. Regularities were found with creep curves depending on the experiment time and the required time for this was proposed. The method for predicting the creep curve for 300 h over the first 60 min of creeping is described. This method of description is a new method in comparison with other related studies on this topic. The accumulated experience of experimental data provides the basis for the development of a standard for determining the complex of physical and mechanical properties of halogen rocks. The described surveys were tested by OOO Gazprom Geotechnology.
***The conclusion*** is the presence of a new proposed method for predicting the experiment for the first 40 minutes of creeping.

*Keywords*: salt rock test, creep curves, loading conditions, experimental creep curve, experiment timing, geomechanics.

## REFERENCES

1. Ivanov A. A., Levitsky Yu. F. 1960, *Geologiya galogennykh otlozheniy (formatsiy) SSSR* [Geology of halogen deposits (formations) of the USSR]. Moscow, 424 p.
2. Khokhlov A. V. 2016, Stress rupture curves of the nonlinear model of viscous elasticity and plasticity of the Maxwell type and the summation rule of damage under step loading. *Vestnik SamGTU* [Journal of Samara State Technical University], Series "Physical and mathematical Sciences", vol. 20, no. 3, pp. 524–543. (*In Russ.*)
3. Khokhlov A. V. 2008, Defining relationship ofrheological processes with a known loading history. *Izvestiya RAN* [Bulletin of the Russian Academy of Sciences, Mechanics of solids], no. 2, pp. 140–160. (*In Russ.*)
4. Dimitrienko Yu. I., Yurin Yu. V. 2015, Finite-element modeling of the stress-strain state of rocks with regard to creeping. *Matematicheskoye modelirovaniye i chislennyye metody* [Mathematical modeling and computational methods], no. 3, pp. 101–118. (*In Russ.*)
5. Ilyinov M. D., Kartashov Yu. M. 2011, Accelerated method for determining the rheological properties of rocks, St. Petersburg: *Zapiski Gornogo instituta* [Journal of Mining Institute], vol. 190, pp. 207–209. (*In Russ.*) Link
6. Hakan Özşen, İhsan Özkan, Cem Şensöğüt. 2014, Measurement and mathematical modelling of the creep behaviour of Tuzköy rock salt. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, vol. 66, pp. 128–135.
7. Yu Zhang, Wei-yaXu, Jian-fu Shao, Hai-bin Zhao, Wei Wang. 2015, Experimental investigation of creep behavior of clastic rock in Xiangjiaba Hydropower Project. *Water Science and Engineering*, vol. 8, issue 1, pp. 55–62.
8. Ageenko V. A. 2012, Development of algorithms for computer-aided design of ground-based space in the historic centre of Moscow and in the adjacent territories. *Gorny Informatsionno-Analiticheskiy Byulleten* [Mining Informational and Analytical Bulletin], no. 5, pp. 358–359. (*In Russ.*)
9. Ageenko V. A., Baklashov I. V. 2015, Development of the theory and modeling of arch formation in the vicinity of the horizontal working. *Gorny Informatsionno-Analiticheskiy Byulleten* [Mining Informational and Analytical Bulletin], no. 12, pp. 5–7.
10. Pankov I. L., Asanov V. A., Udartsev A. A., Kuz'minykh V. S., Evseev V. S. 2014, *Osobennosti deformirovaniya i razrusheniya solyanykh porod* [Features of deformation and destruction of salt rocks]. Problems of safety and efficiency of development of georesources in modern conditions: proceedings of the scientific and practical conference. Perm, pp. 304–311.
11. Pankov I. L., Udartseva A. A. 2011, Experimental study of salt formation in creeping. *Geologiya i poleznyye iskopayemyye Zapadnogo Urala* [Geology and minerals of the Western Urals], no. 11, pp. 205–207. (*In Russ.*)
12. Lavrov A. 2003, The Kaiser effect in rocks: principles and stress estimation techniques. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, vol. 40, no. 2, pp. 151–171.
13. El Hassan Ait Laasri, Es-Said Akhouayri, Dris Agliz, Abderrahman Atmani. 2014, Automatic detection and picking of P-wave arrival in locally stationary noise using cross-correlation. *Digital Signal Processing*, vol. 26, pp. 87–100. http://dx.doi.org/10.1016/j.dsp.2013.12.009
14. Addair T. G., Dodge D. A., Walter W. R., Ruppert S. D. 2014, Large-scale seismic signal analysis with Hadoop. *Computers and Geosciences*, vol. 66, pp. 145–154.
15. Yoon C. E., O'Reilly O., Bergen K. J., Beroza G. C. 2015, Earthquake detection through computationally efficient similarity search. *Science Advances*, vol. 1, issue 11. e1501057. https://doi.org/10.1126/sciadv.1501057

*The article was received on January 16, 2018*

* valera.ageenko@mail.ru
https://orcid.org/0000-0001-7190-964X

УДК 622.67 https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-1-121-127

# Обоснование параметров подземной геотехнологии освоения рассредоточенных рудных тел ярусного залегания

**Артур Маратович МАЖИТОВ***,
**Сергей Александрович КОРНЕЕВ,**
**Дмитрий Викторович ДОМОЖИРОВ,**
**Павел Владимирович ВОЛКОВ**

Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, Россия, Магнитогорск

**Актуальность работы.** Многие горнодобывающие предприятия в настоящее время находятся в стадии доработки и исчерпали практически весь свой ресурсный потенциал. Однако зачастую при отработке месторождений остается некоторое количество запасов в недрах, ранее считавшихся неперспективными и невостребованными. Это приводит к необходимости изыскания возможностей их освоения. Такие участки, в частности для медноколчеданных месторождений, представлены рассредоточенными по всему шахтному полю линзообразными рудными телами, как правило, малой мощности и с низким содержанием полезного компонента. В связи с этим обоснование подземной геотехнологии отработки таких рудных тел и залежей является весьма актуальной теоретической и практической задачей.

**Цель работы.** Обоснование оптимальной геотехнологии отработки рассредоточенных рудных тел ярусного залегания для эффективной отработки месторождения.

**Методология исследования.** Обоснование технологии освоения участка месторождения производилось с помощью геотехнологического конструирования вариантов технологических схем отработки и их технико-экономического сравнения на основе экономико-математического моделирования.

**Результаты.** В статье дано обоснование способа вскрытия и систем разработки месторождения, представленного рассредоточенными рудными телами ярусного залегания. Исследованиями определенно, что оптимальным вариантом отработки рассредоточенных рудных тел является вскрытие с максимальным использованием существующих горно-капитальных и подготовительных выработок и стадийный порядок ведения горных работ с одновременной отработкой балансовых и забалансовых запасов. Также в работе на основе ранжирования участков залежи по элементам залегания и содержанию полезного компонента путем экономико-математического моделирования определены оптимальные системы разработки в вариантах с максимально возможной рудной подготовкой.

**Выводы.** Выводы и рекомендации, представленные в работе, могут быть использованы при проектировании и планировании горных работ при освоении месторождений схожих по горно-геологическим и горнотехническим характеристикам.

*Ключевые слова*: подземная геотехнология, рассредоточенные рудные тела, системы разработки, вскрытие месторождения, экономическая эффективность.

## Введение

Анализ практики работы предприятий по добыче руд цветных металлов на территории Урала указывает на существенное истощение минерально-сырьевой базы в связи с длительной и интенсивной их отработкой. Многие крупные медноколчеданные месторождения региона находятся в стадии доработки. Их устойчивое функционирование и развитие достигается за счет прироста запасов в результате эксплуатационной разведки и отработки ранее неперспективных и невостребованных участков и залежей. К технологии отработки таких запасов предъявляются жесткие требования с позиции экономической эффективности и безопасности горных работ.

С учетом изложенного данный подход был реализован при проектировании отработки I залежи Камаганского месторождения (Республика Башкортостан).

В настоящее время эксплуатация многих рудных месторождений связана с истощением их минерально-сырьевой базы. Развитие и стабильное функционирование предприятия предопределено возможностью отработки ранее невостребованных и неперспективных участков месторождения [1–5]. Указанное обстоятельство, несомненно, является актуальным и требует теоретических и практических решений. Так, руды I залежи являются сырьевой базой для восполнения выбывающих мощностей Камаганского месторождения и поддержания устойчивого функционирования предприятия на ближайшие годы [6]. Поэтому проведение исследований по обоснованию подземной геотехнологии освоения I залежи является весьма актуальным вопросом на данном этапе развития предприятия.

## Характеристика месторождения

Месторождение характеризуется большим количеством рассредоточенных по всему шахтному полю отдельных линзообразных маломощных рудных тел (рис. 1) со сложной морфологией и широким диапазоном изменения содержания полезного компонента. I залежь представлена группой линзообразных рудных тел мощностью от 1–1,5 м до 20 м и углом падения от 0° до 30°. Всего выделено 15 рудных тел, залегающих ярусно в интервале от 47,4 до 726,5 м, размеры по простиранию от 50 до 320 м, вкрест простирания – от 20 до 160 м. Руды преимущественно густовкрапленные, обломковидные, редко встречаются отдельные интервалы сплошных руд с содержанием меди от 0,68 до 2,9 % и цинка от 1,0 до 2,3 %. Рудные тела имеют прослои пустых пород. Эксплуатационные запасы залежи (до границы горного отвода) составляют 703,45 тыс. т. Ниже горного отвода также имеются рудные тела.

Отработка участка осложнена интенсивной трещиноватостью тектонического и рядового характера, а также наличием охраняемых объектов второй категории в зоне сдвижения от подземных горных работ. Проведенными геомеханическими исследованиями [7, 8] установлено, что прогнозные величины деформаций поверхности не превы-

* ✉ a.mazhitov@magtu.ru
https://orcid.org/0000-0001-8219-4264

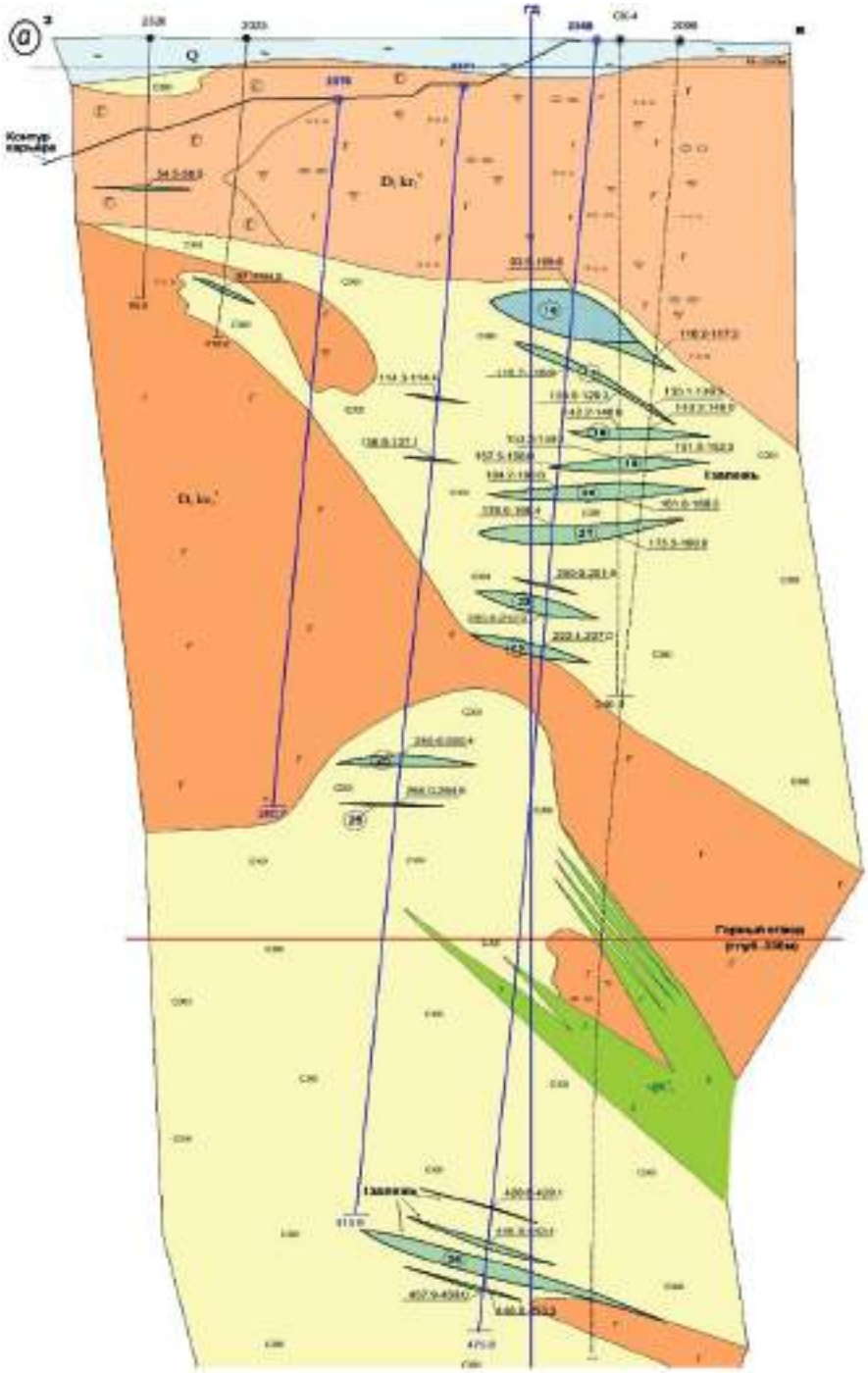


**Рисунок 1. Характерный геологический разрез I залежи.**
**Figure 1. I deposit typical geological section.**

шают 2 мм/м, что является допустимым для данной категории охраняемых объектов. В связи с этим отсутствует необходимость экономической оценки ущерба от подработки охраняемых объектов и их переноса.

В связи с неравномерным распределением полезного компонента по рудным телам залежи с целью определения влияния содержания полезного компонента на удельную прибыль для систем разработки с естественным поддержанием очистного пространства (камерная с открытым очистным пространством и камерно-столбовая система разработки), обрушением руды и вмещающих пород (варианты этажного и подэтажного обрушения) и с закладкой выработанного пространства (камерная с закладкой и горизонтальных слоев с закладкой) при постоянной мощности рудного тела и цене металла построены зависимости (рис. 2) и проведен соответствующий анализ.

## Результаты

Анализ построенных зависимостей [9, 10] показал, что при содержании полезного компонента от 1 до 2 % происходит конкуренция низкозатратных систем разработки с дорогостоящими вариантами по себестоимости добычи с закладкой выработанного пространства, за исключением системы разработки горизонтальных слоев с закладкой, где отмечается минимальная удельная прибыль при небольших содержаниях полезного компонента. Далее от 2 до 3 % про-

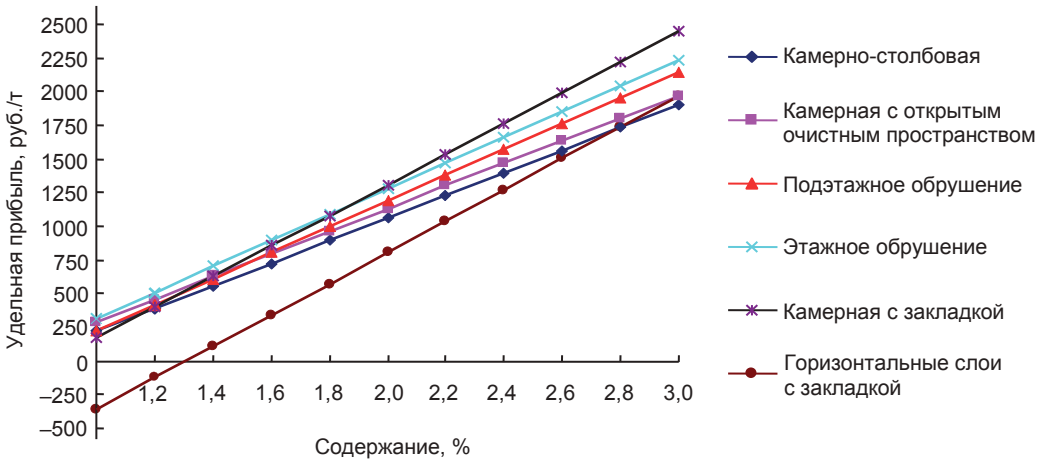



**Рисунок 2. График зависимости удельной прибыли от содержания полезного компонента.**
**Figure 2. Dependence diagram of profit per unit on the content of useful component.**

исходит характерное увеличение удельной прибыли, где на первом месте доминирует камерная система разработки с закладкой выработанного пространства, а на второе и третье место выходят варианты систем разработки с обрушением руды и вмещающих пород. Разница между данными системами разработки по удельной прибыли минимальна: 50–100 руб./т при содержании 2–2,6 %. При содержании полезного компонента 2,8–3 % система разработки горизонтальных слоев с закладкой составляет конкуренцию системам разработки с естественным поддержанием очистного пространства, а разница между системами разработки камерной с закладкой и вариантами этажного и подэтажного обрушения максимальна и составляет 200–250 руб./т.

Согласно проведенному экономико-математическому моделированию, в целях эффективной реализации подземной геотехнологии было проведено районирование рудных тел I залежи по элементам залегания и содержанию полезного компонента и определены возможные варианты систем разработки. Наличие охраняемых объектов предопределило применение систем разработки с полной закладкой выработанного пространства, либо оставлением регулярных рудных и искусственных целиков при малой мощности рудных тел и низком содержании полезного компонента.

В соответствии с изложенным рекомендуются следующие варианты систем разработки:

– этажно-камерная система разработки с закладкой (рудные тела мощностью более 10–12 м при любом угле падения);

– камерно-столбовая система разработки с однослойной выемкой и закладкой при мощности рудного тела 2–6 м и 6–10 м (рудные тела и выклинки мощностью от 2 до 6 м с углом падения до 30°);

– камерно-столбовая система разработки с оставлением рудных и искусственных опорных целиков (рудные тела с низким содержанием полезного компонента);

– камерно-столбовая система разработки с доставкой руды силой взрыва (участки рудных тел с углом падения более 30–35°).

Согласно эмпирическим зависимостям по сравнительной оценке систем разработки, приведенным в [11, 12], применительно к различным вариантам систем разработки были рассчитаны основные экономические показатели.

При обосновании способа вскрытия были рассмотрены четыре варианта. Первый вариант предусматривал схему вскрытия с использованием выработок месторождения «Новый Сибай», в частности скипо-клетевого ствола и существующей штольни гор. 140 м. Второй вариант заключался в обособленном вскрытии залежи с использованием вертикальных клетевых стволов с поверхности без использования выработанного пространства карьера. Для снижения капитальных затрат рассмотрен третий вариант с лифтовым восстающим на поверхность и существующей штольней. Четвертый вариант отличался максимальным использованием существующих выработок, а именно двумя штольнями, пройденными из выработанного пространства карьера. Последний вариант предполагает поддержание карьерной транспортной системы на весь период отработки подземных запасов.

Ввиду значительного разброса рудных тел по глубине, каждая из возможных схем вскрытия целесообразна только для отдельного участка залежи. Поэтому по экономическим и технологическим соображениям рудная залежь по глубине условно разделяется на участки относительно дна карьера или главной вскрывающей выработки, роль которой в данном случае выполняет существующая штольня гор. 140 м. Кроме того, рекомендуется поэтапный ввод участков в эксплуатацию с обособленным проветриванием каждого по мере развития горных работ.

С учетом изложенного выделены три обособленных участка (рис. 3):

– запасы, находящиеся в этаже 140–50 м (от поверхности до дна карьера);

– запасы, 140–330 м (от дна карьера до границ горного отвода);

– запасы, расположенные ниже горного отвода.

*Первый комплекс (пусковой)*. В качестве главной вскрывающей выработки используется штольня гор. 140 м, которая служит для подачи свежего воздуха, выдачи горной массы, входа-выхода людей и доставки материалов. От штольни за зоной сдвижения от очистных работ нижнего участка (140–330 м) проходится наклонный съезд гор. 50/140 м, соединяющий рабочие горизонты участка. Лифтовый восстающий гор. 0/120 м служит для выдачи загрязненного воздуха и в качестве второго механизированного выхода. Способ проветривания нагнетательный, используется существующая

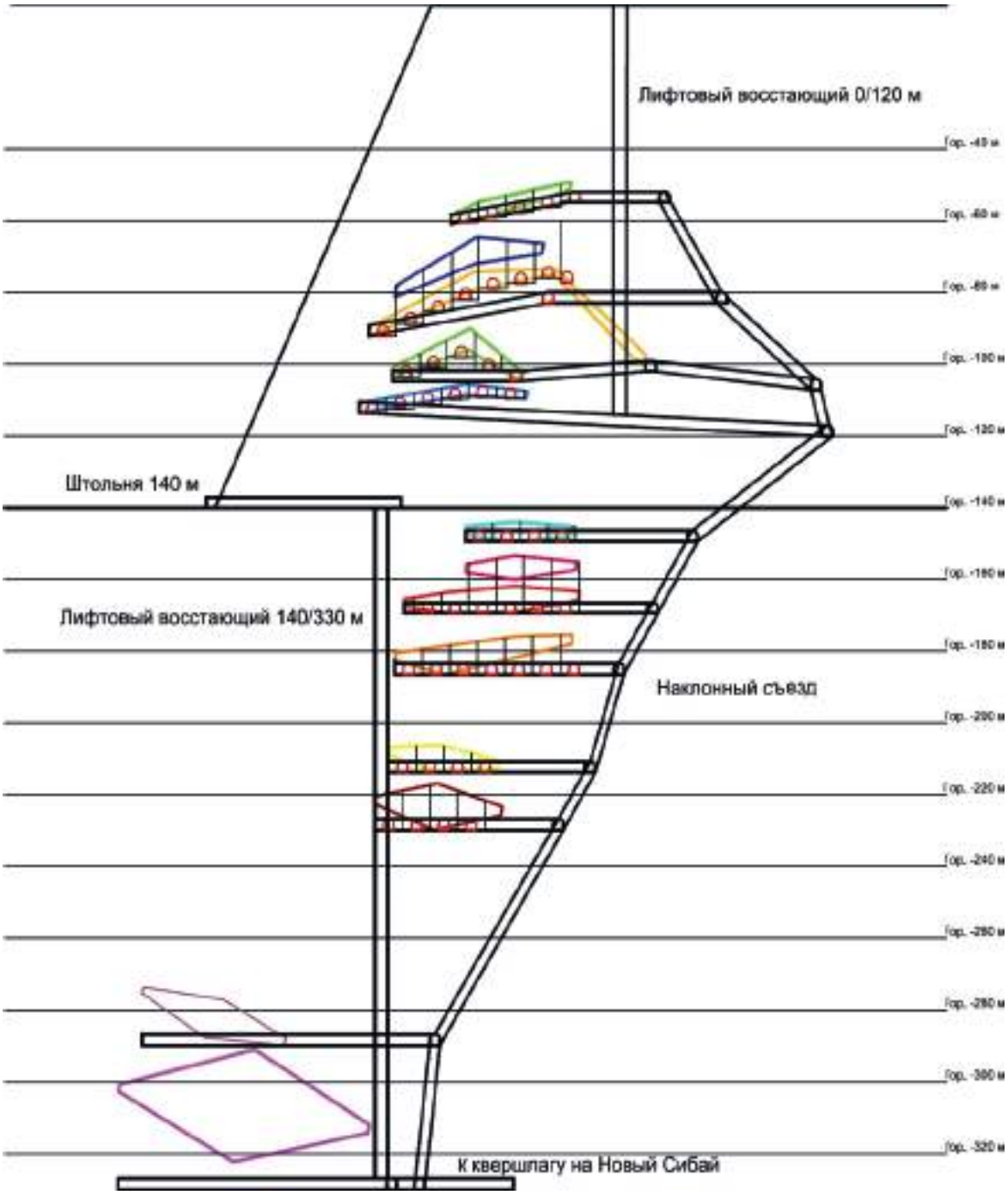



**Рисунок 3. Схема вскрытия Первой залежи Камаганского месторождения.**
**Figure 3. Scheme of opening of the First Deposit of the Kamaganskoe field.**

вентиляторная установка у портала штольни гор. 140 м, включающая вентилятор ВЦП-16. Свежий воздух подается по штольне на наклонный съезд, омывает участки очистных работ и через лифтовый восстающий 0/120 м выдается на поверхность.

*Второй комплекс.* После ввода в эксплуатацию первого пускового комплекса осуществляется строительство горизонтов ниже дна карьера до горного отвода (330 м). В качестве воздухоподающей выработки планируется использовать клетевой ствол участка «Новый Сибай» Сибайского месторождения. Для этого используется существующий квершлаг «Новый Сибай–Камаган». От существующего квершлага проходится наклонный квершлаг 210/330 м к участку I залежи. Участки очистных работ соединяются между собой наклонным съездом гор. 140/330 м. В качестве запасного выхода планируется проходка лифтового восстающего гор. 140/330 м. Способ проветривания нагнетательный. Свежий воздух подается по клетевому стволу участка «Новый Сибай» по наклонному квершлагу на гор. 330 м. Далее по наклонному съезду подается на эксплуатационные участки рудных тел, омывает очистные работы и выдается через штольню гор. 140 м в карьер.

*Третий комплекс (заключительный).* Вскрытие рудных тел (№ 26, 27), находящихся ниже горного отвода, осуществляется углубкой наклонного съезда и лифтового восстающего.

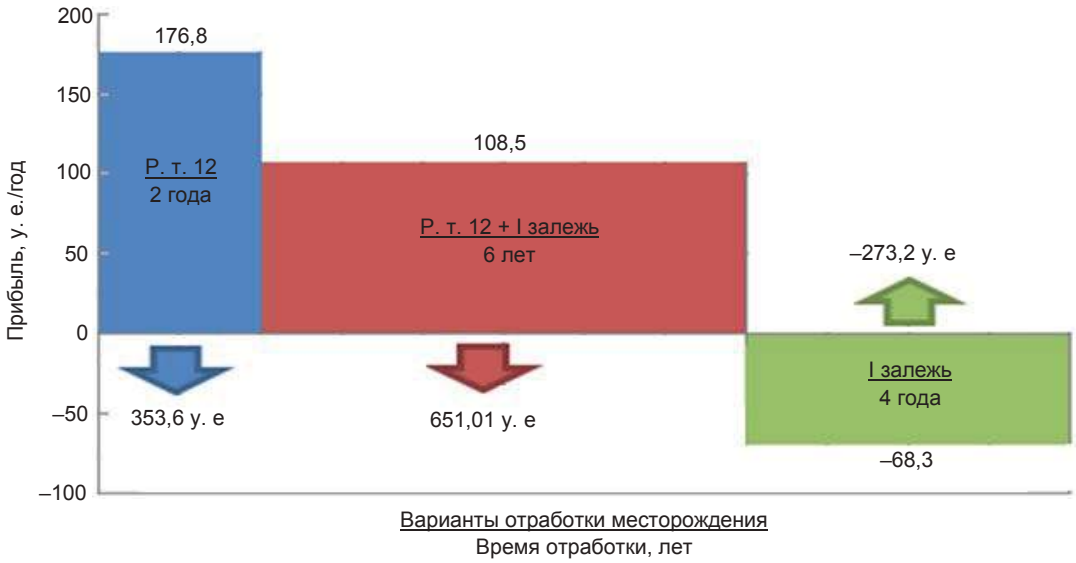



**Рисунок 4. Показатели технико-экономического моделирования.**
**Figure 4. Indicators of technical and economic modeling.**

Таким образом, каждый участок вскрыт обособленно с использованием всех предполагаемых вариантов.

В связи с небольшой мощностью рудных тел, с целью минимизации полевых горно-подготовительных работ принимается рудная подготовка с помощью доставочных штреков, пройденных с наклонного съезда. Наклонный съезд проходится в лежачем боку залежи максимально близко к выемочному участку с целью сокращения длины полевого доставочного штрека. Рудные тела отрабатываются обособленно и представляют собой отдельные выемочные участки. Высота этажа (подэтажа) изменяется в зависимости от условий залегания, но не более 40 м, согласно «Федеральным нормам и правилам…» для ВХВ без механизированного подъема.

Подготовительные работы заключаются в проведении на каждом выемочном участке комплексов выработок, необходимых для отработки запасов руды принятыми системами разработки. В общем случае подготовка рудных тел залежи одинакова и заключается в проведении доставочного и вентиляционно-закладочного штреков на флангах рудного тела и буро-доставочных ортов. Расположение вентиляционно-закладочного штрека выбирается с учетом разницы отметок с доставочным штреком. Орты проводятся по оси отрабатываемой камеры. Рудные тела, имеющие сравнительно небольшой прослой пустых пород между собой, объединяются в одну рудную зону и отрабатываются совместно. Одновременно в отработке может находиться несколько рудных тел. Отработку запасов нижерасположенного рудного тела возможно начинать после уходки фронта очистной выемки на верхнем рудном теле за зону сдвижения, построенную по соответствующим углам, но не менее 20 м относительно верхней границы рудного тела на нижнем участке.

Окончательный технико-экономический расчет технологической схемы отработки рассредоточенных рудных тел показал отрицательный результат. Освоение запасов при всех принятых оптимальных параметрах подземной геотехнологии отработки запасов I рудной залежи Камаганского месторождения сводится к нецелесообразности. Однако, согласно принципам рационального освоения месторождения [13–15] и утвержденным запасам оставление их в недрах невозможно. В связи с этим был проанализирован вариант одновременной отработки I залежи и запасов выклинки р. т. 12. Показатели экономико-математического моделирования показаны на рис. 4.

Согласно расчетам, убыток от отработки I залежи составит 273,2 у. е. Очевидна целесообразность совместной отработки I залежи и неотработанной карьером южной выклинки р. т. 12. Ежегодная прибыль при этом составит 108,5 у. е. при шестилетнем периоде отработки. Общий объем прибыли – более 651 у. е. Индивидуальная отработка р. т. 12 увеличивает годовую прибыль предприятия до 176,8 у. е., но срок отработки сокращается до двух лет.

Согласно сказанному, отработка рудной залежи, представленной рассредоточенными рудными телами, целесообразна при максимальном использованим существующих горно-капитальных выработок. При этом необходимо разделение залежи на участки с индивидуальным вскрытием и схемой проветривания. Минимизировать убытки возможно за счет совместного освоения всех запасов месторождения.

## Заключение

Несмотря на отрицательный экономический эффект, опыт проектирования отработки I залежи Камаганского месторождения, представленной рассредоточенными рудными телами малой мощности и ярусного залегания, содержит ряд полезных положений для исследований, проектирования и освоения схожих по горно-геологическим характеристикам рудных залежей. Среди них можно выделить следующие.

1. При ярусном залегании рассредоточенных рудных тел отработка залежи производится без объединения их в одну рудную зону.

2. Вскрытие залежи производится с учетом максимального использования существующих горно-капитальных выработок.

3. При выборе систем разработки предварительно производится ранжирование рудных тел по элементам залегания и содержанию полезного компонента и для каждого участка рекомендуется свой вариант.

4. Рациональный порядок развития фронта горных работ с целью минимизации первоначальных капитальных вложений заключается в разделении залежи по вертикали на участки с обособленным проветриванием и поочередным вводом их в эксплуатацию.

5. Отработка залежей, имеющих подобную морфологию и условия залегания, целесообразна только совместно с отработкой основных запасов месторождения для поддержания производственной мощности предприятия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bruntland G. (ed.). Our common future: The World Commission on Environment and Development, United Nations. Oxford: Oxford University Press, 1987. 300 p.
2. Auty R. M., Mikesell R. F. Sustainable Development in Mineral Economies. Oxford: Clarendon Press, 1998. 285 p.
3. Stansinoupolos P., Smith M. H., Hargroves K., Desha Ch. Whole System Design: An Integrated Approach to Sustainable Engineering. London: Earthscan, 2008. 183 p.
4. Каплунов Д. Р., Рыльникова М. В., Радченко Д. Н. Расширение сырьевой базы горнорудных предприятий на основе комплексного использования минеральных ресурсов месторождений // Горный журнал. 2013. № 12. С. 29–33. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=21116802
5. Каплунов Д. Р., Рыльникова М. В., Радченко Д. Н. Условия устойчивого развития минерально-сырьевого комплекса России // Условия устойчивого функционирования минерально-сырьевого комплекса России: препринт. 2014. Вып. 1. С. 3–11.
6. Рыльникова М. В., Корнеев С. А., Мажитов А. М., Корнеева В. С. Обоснование способов освоения и систем разработки маломощных рудных тел Камаганского медноколчеданного месторождения // Горный журнал. 2014. № 5. С. 86–90. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=21759530
7. Мажитов А. М. Оценка влияния подземных горных работ на напряженно-деформированное состояние прикарьерного массива месторождения Камаганское // Актуальные проблемы горного дела. 2016. № 1. С. 29–35.
8. Tishkov M. V., Semenov D. P., Neverov A. A., Neverov S. A., Nikolsky A. M. Geomechanical analysis of mining system by cut and fill at deep levels of Internatsionalnaya pipe // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018. Vol. 134, issue 1. № 012063. https://doi.org/10.1088/1755-1315/134/1/012063
9. Калмыков В. Н., Волков П. В., Мещеряков Э. Ю. Разработка интегрированных технологических схем интенсивного освоения запасов приграничных зон карьеров // Комбинированная геотехнология: комплексное освоение и сохранение недр Земли: материалы междунар. науч.-техн. конф. Екатеринбург, 2009. С. 31–33.
10. Мещеряков Э. Ю., Иванов А. А. Методика выбора технологических схем при освоении ярусно залегающих рудных тел // Вестник МГТУ. 2003. № 4. С. 16–19.
11. Мажитов А. М. Обоснование параметров технологии отработки пологих медноколчеданных месторождений с обрушением руды и вмещающих пород: дис. … канд. техн. наук. Магнитогорск, 2013. 140 с.
12. Sokolov I. V., Balek A. N., Antipin Yu. G., Smirnov A. A. Substantiation of underground geotechnology for hybrid mining of Kyshtym quartz deposits // Gornyi Zhurnal. 2016. Issue 5. P. 58–63. https://doi.org/10.17580/gzh.2016.05.07
13. Rylnikova M., Ainbinder I., Radchenko D. Role of Safety Justification of Mining Development for the Regulatory Framework Formation and Mineral Resources Management // E3S Web of Conferences. 2018. Vol. 41, № 01033. https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184101033
14. Kaplunov D. R. Combined geotechnology in sustainable ecologically balanced subsoil management // Gornyi Zhurnal. 2018. Issue 1. P. 14–17. https:doi.org/10.17580/gzh.2018.01.01
15. Трубецкой К. Н., Чантурия В. А., Каплунов Д. Р., Рыльникова М. В. Комплексное освоение месторождений и глубокая переработка минерального сырья. М.: ИПКОН РАН, 2010. 437 с.

*Статья поступила в редакцию 15 декабря 2018 г.*

# Substantiation of parameters of underground geotechnology for the development of dispersed ore bodies of staged occurrence

**Artur Maratovich MAZHITOV,**
**Sergey Aleksandrovich KORNEEV,**
**Dmitriy Viktorovich DOMOZHIROV,**
**Pavel Vladimirovich VOLKOV**

Nosov Magnitogorsk State Technical University
Magnitogorsk, Russia

**Relevance of the work.** Many mining enterprises are currently in the process of development and have exhausted almost all of their resource potential. However, when development of deposits there remains a certain amount of reserves in the depths that previously considered to be unpromising and unclaimed. This leads to the need to search for opportunities for their development. Such zones, foe example, for copper-sulphide deposits, are represented by pod-like ore bodies dispersed throughout the mine field, as a rule, of low thickness and with a low content of useful component. In this regard, the substantiation of the underground geotechnology of mining such ore bodies and deposits is a very relevant theoretical and practical task.
**Purpose of the work.** Substantiation of the optimal geotechnology for mining of dispersed ore bodies of stepped occurrence for efficient field mining.
**Research methodology.** The substantiation of the field development was made using geotechnological detailing of options for technological development schemes and their technical and economic comparison based on economic and mathematical modeling.
**Results.** The paper provides a rationale for the method of deposit opening and mining systems represented by dispersed ore bodies of staged occurrence. The study helped to determine that the best option for performance of dispersed ore bodies is opening with maximum use of existing mining and development workings and a stagen mining procedure with simultaneous performance of reserves (or non-commercial reserves). Moreover, based on ranking of sites, the optimal mining systems with the highest possible ore preparation were determined by economic and mathematical modeling taking into account the elements of occurrence and the content of useful component.
**Conclusions.** Conclusions and recommendations presented in this work can be used while design and planning of mining operations in the development of deposits of similar geological and mining characteristics.

*Keywords*: underground geotechnology, dispersed ore bodies, mining systems, deposit opening, economic efficiency.

## REFERENCES

1. Bruntland G. (ed.). 1987, Our common future: The World Commission on Environment and Development, United Nations. Oxford: Oxford University Press, 300 p.
2. Auty R. M., Mikesell R. F. Sustainable Development in Mineral Economies. Oxford: Clarendon Press, 1998. 285 p.
3. Stansinoupolos P., Smith M. H., Hargroves K., Desha Ch. 2008, Whole System Design: An Integrated Approach to Sustainable Engineering. London: Earthscan, 183 p.
4. Kaplunov D. R., Rylnikova M. V., Radchenko D. N. 2013, Expansion of the resource base of mining enterprises on the basis of the integrated use of mineral resources of deposits. *Gornyi zhurnal* [Mining journal], no. 12, pp. 29–33. (*In Russ.)* URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=21116802
5. Kaplunov D. R., Rylnikova M. V., Radchenko D. N. 2014, *Usloviya ustoychivogo razvitiya mineral'no-syr'yevogo kompleksa Rossii* [Conditions for sustainable development of the mineral resource complex of Russia]. Conditions for satable functioning of the mineral resources complex in Russia: preprint. Issue 1, pp. 3–11.
6. Ryl'nikova M. V., Korneev S. A., Mazhitov A. M., Korneeva V. C. 2014, Substantiation of the development methods and mining systems of low-thickness ore bodies of the Kamaganskoye copper-sulphide field. *Gornyi Zhurnal* [Mining Journal], no. 5, pp. 86–90. (*In Russ*.) URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=21759530
7. Mazhitov A. M. 2016, Estimation of influence of underground mining on the stress-strain state of close to qarry massif of the Kamaganskoe field. *Aktual'nyye problemy gornogo dela* [Topical issues of mining], no. 1, pp. 29–35. (*In Russ*.)
8. Tishkov M. V., Semenov D. P., Neverov A. A., Neverov S. A., Nikolsky A. M. 2018, Geomechanical analysis of mining system by cut and fill at deep levels of Internatsionalnaya pipe. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, vol. 134, issue 1. 012063. https://doi.org/10.1088/1755-1315/134/1/012063
9. Kalmykov V. N., Volkov V. P., Meshcheryakov E. Yu. *2009, Razrabotka integrirovannykh tekhnologicheskikh skhem intensivnogo osvoyeniya zapasov prigranichnykh zon kar'yerov* [Development of integrated technological schemes for the intensive development of reserves in the border areas of quarries]. Combined geotechnology integrated development and conservation of the earth's subsoil: proceedings of the international scientific and technical conference, Ekaterinburg, pp. 31–33.
10. Meshcheryakov E. Yu., Ivanov A. A. 2003 Choice technique of technological schemes in the development of staged ore bodies. *Vestnik MGTU* [Scientific journal of Murmansk State Technical University], no. 4, pp. 16–19. (*In Russ*.)
11. Mazhitov A. M. 2013, *Obosnovaniye parametrov tekhnologii otrabotki pologikh mednokolchedannykh mestorozhdeniy s obrusheniyem rudy i vmeshchayushchikh porod* [Substantiation of parameters of the technology for mining flat copper-sulphide deposits with ore caving and host rocks]. PhD thesis. Magnitogorsk, 140 p.
12. Sokolov I. V., Balek A. N., Antipin Yu. G., Smirnov A. A. 2016, Substantiation of underground geotechnology for hybrid mining of Kyshtym quartz deposits. *Gornyi Zhurnal* [Mining journal], issue 5, pp. 58–63. https://doi.org/10.17580/gzh.2016.05.07
13. Rylnikova M., Ainbinder I., Radchenko D. 2018, Role of Safety Justification of Mining Development for the Regulatory Framework Formation and Mineral Resources Management. E3S Web of Conferences, vol. 41, 01033. https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184101033
14. Kaplunov D. R. 2018, Combined geotechnology in sustainable ecologically balanced subsoil management. *Gornyi Zhurnal* [Mining journal], issue 1, pp. 14–17. https:doi.org/10.17580/gzh.2018.01.01
15. Trubetskoy K. N., Chanturiya, V. A., Kaplunov D. R., Ryl'nikova M. V. *2010, Kompleksnoye osvoyeniye mestorozhdeniy i glubokaya pererabotka mineral'nogo syr'ya* [Integrated development of deposits and deep processing of mineral raw materials]. Moscow, 437 p.

*The article was received on December 15, 2018*

* a.mazhitov@magtu.ru
https://orcid.org/0000-0001-8219-4264

УДК 629.353 https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-1-128-135

# Электрифицированный автотранспорт для подземных и открытых горных работ

**Марк Леонтьевич ХАЗИН***

Уральский государственный горный университет, Россия, Екатеринбург

***Цель работы*** – повышение энергосбережения горного предприятия за счет использования электроэнергии и уменьшения расходов на дизельное топливо.
***Методология проведения работы.*** Анализ возможных направлений осуществления энергосбережения горного предприятия.
***Результаты работы.*** Горнодобывающая промышленность является одним из основных потребителей энергии, и горнодобывающие компании все больше внимания уделяют мероприятиям по энергосбережению и экономически эффективным способам генерации энергии. Одной из самых больших статей расхода при горных работах является энергия, необходимая для добычи и переработки минеральных руд. При разработке месторождений полезных ископаемых основным видом технологического транспорта является автотранспорт с дизельными двигателями. Для перевозки горной массы мировая горнодобывающая промышленность ежегодно расходует миллиарды литров дизельного топлива. Наряду со многими достоинствами дизельные двигатели имеют и определенные недостатки. Одним из перспективных направлений энергосбережения горного предприятия является использование электроэнергии. Это приводит к экономии дизельного топлива и уменьшению объема выбросов отработанных газов. Рассмотрены пять основных способов подачи электроэнергии на двигатель: дополнительный силовой кабель, воздушная контактная сеть, встроенный аккумулятор, топливные элементы, электрогенератор, а также транспортные средства с комбинированной силовой установкой.
***Выводы.*** Повышение эффективности работы горного предприятия может достигаться за счет значительной экономии топлива, повышения производительности процесса транспортирования горной массы, сокращения автопарка, уменьшения расходов на эксплуатацию и техническое обслуживание. Электропривод позволяет увеличить межремонтные интервалы двигателя, снизить затраты на потребляемую энергию за счет регенерации и возвращения ее в сеть, а также уменьшить или исключить выбросы отработанных газов.

*Ключевые слова*: энергосбережение, электропривод, подземные горные работы, открытые горные работы, самосвал с комбинированной силовой установкой, экология.

## Введение

В настоящее время при обеспечении устойчивого функционирования промышленных предприятий все большее внимание уделяется энергетическому фактору. Эффективное использование энергетического потенциала является необходимой основой для модернизации промышленной сферы и всей экономики. Горнодобывающая промышленность является одним из основных потребителей энергии, и горнодобывающие компании все больше внимания уделяют мероприятиям по энергосбережению и экономически эффективным способам генерации энергии. Одной из самых больших статей расхода при горных работах является энергия, необходимая для добычи и переработки минеральных руд. Этот спрос на энергию обычно удовлетворяется за счет дизельного топлива или электроэнергии.

Для перевозки горной массы мировая горнодобывающая промышленность ежегодно расходует миллиарды литров дизельного топлива. Типичный самосвал потребляет от 50 000 до 100 000 л дизельного топлива в год в зависимости от условий его применения и может выделять от 131 до 262 т $CO_2$ в отработанных газах. Например, согласно официальной статистике за 2012 г., только в Мурманской области горнорудные компании ООО «Апатит», Ковдорский ГОК, Оленегорский ГОК и Кольская горно-металлургическая компания потребили 139 тыс. т дизельного топлива. Компания АК «АЛРОСА» ежегодно на бензин и дизельное топливо расходует 2 млрд руб., основная доля которых приходится на дизельное топливо для карьерных самосвалов.

Наряду с многими достоинствами дизельные двигатели имеют и определенные недостатки. Основными технико-экономическими и экологическими недостатками дизельных двигателей являются: невысокая энергетическая эффективность; значительный расход энергии на выработку теряющегося в пространстве тепла; относительно низкая скорость движения на подъеме; существенный объем технического обслуживания; высокий уровень шума и вибрации; большой объем выбросов отработанных газов, загазованность атмосферы и возможность образования тумана.

Особенностью современного периода является увеличение глубины разработки месторождений полезных ископаемых. С ростом глубины горных работ ухудшаются условия естественного проветривания рабочего пространства карьеров. На глубине карьеров более 200–250 м загрязнение воздуха вредными веществами на рабочих местах приводит к постепенному превышению предельно допустимых концентраций и не отвечает требованиям ГОСТ 12.1.005–88 «Воздух рабочей зоны» [1].

На многих угольных шахтах и рудниках России объем воздуха, подаваемого в горные выработки, недостаточен для разбавления выхлопных газов дизелей до предельно допустимых концентраций [2]. Затраты на нагнетание в карьер чистого воздуха, необходимого для проветривания, часто перекрывают затраты на расход топлива карьерных самосвалов даже при условии, что экскаваторы в забое запитаны от кабеля – сети переменного или постоянного тока [3–5].

**Цель работы** – повышение энергосбережения горного предприятия за счет использования электроэнергии и уменьшения расходов на дизельное топливо.

**Методология проведения работы**. Анализ возможных направлений осуществления энергосбережения горного предприятия за счет уменьшения потребления дизельного топлива.

**Результаты работы**. Одним из перспективных направлений уменьшения расхода топлива, объема отработанных газов и повышения производительности горного предприятия является использование электроэнергии. На данный мо-

* ✉ khasin@ursmu.ru
https://orcid.org/0000-0002-6081-4474

**Рисунок 1. Грузовик с кабельным приводом EST-1030 [6].**
**Figure 1. The truck with cable gear system EST-1030 [6].**

мент технология электрического привода является самым быстрым и эффективным способом существенного снижения энергопотребления. Интерес к электроприводу связан, в первую очередь, с возможностью уменьшения потребления дизельного топлива карьерными самосвалами и использования большей мощности на двигателе. Эти особенности делают электроприводы привлекательной альтернативой дизельным двигателям, но их фактические преимущества и недостатки в значительной степени зависят от того, как электроэнергия подается на двигатель самосвала. Имеется пять основных способов подачи электроэнергии на двигатель:

– дополнительный силовой кабель;
– воздушная контактная сеть;
– бортовой аккумулятор;
– топливные элементы;
– дизель-генератор.

### Дополнительный силовой кабель

Электрическая энергия может непрерывно подаваться на транспортные средствачерез задний кабель без необходимости заправки или подзарядки батарей [6, 7], что позволяет уменьшить массу порожнего транспортного средства (рис. 1).

В промышленности используются электрогрузовики-погрузчики грузоподъемностью от 2 до 25 т. Вследствие высокой эффективности электроприводов они оснащены двигателями меньшей мощности, чем их дизельные аналоги. Поэтому у электропогрузчиков имеется более благоприятное соотношение между емкостью кузова и установленной мощностью машины. Например, для 10- и 14-тонных электропогрузчиков Sandvik это соотношение примерно вдвое больше, чем для дизельных машин [6]. В то же время почасовая стоимость работы для дизельных и электрических погрузчиков с одинаковойемкостью ковша аналогична, тогда как операционные расходы могут быть на 10–30 % ниже в зависимости от соотношения цен на дизельное топливо и электроэнергию. Стоимость энергии составляет около 15 % общей стоимости почасовых работ для дизельных погрузчиков и только около 5 % для электропогрузчиков.

Однако эти преимущества имеют определенную цену. Из-за ограниченного размера кабельной катушки, расположенной на электрогрузовике-погрузчике (независимо от того, размещена ли она горизонтально или вертикально), рабочий диапазон транспортного средства ограничен расстоянием менее чем двойная общая длина кабеля, который может храниться на катушке. На практике это означает, что даже при наиболее выгодном соотношении диаметров кабеля и катушки рабочий радиус для больших самосвалов не превышает 700 м (для малых грузовиков это расстояние еще меньше). Поэтому это техническое решение целесообразно использовать для самосвалов небольшой грузоподъемности. Другим недостатком является подверженность кабеля частым повреждениям (во время движения или при зацеплении за острые углы), а во избежание переплетения задних кабелей может работать только один такой погрузчик в определенной области. Кроме того, стоимость кабеля достаточно велика и составляет примерно 60 евро/м.

Применение транспортных средств с кабельным приводом требует специальной инфраструктуры, включая электрические подстанции, коробки трансформаторов, розетки и т. д. Когда необходимо перемещать операции по погрузке и транспортировке в другую зону шахты, рудника или карьера и невозможно подключить погрузчик полностью, должны быть использованы буксируемые дизель-генераторы. Тем не менее транспортные средства с кабельным приводом хорошо зарекомендовали себя в областях, где путь движения относительно короткий и достаточно хорошо определен, что позволяет использовать кабельный привод. Эксплуатация электрических 25-тонных погрузчиков на железном руднике Kiruna в Северной Швеции в течение более 25 лет подтверждает, что в благоприятных условиях эти машины превосходят свои дизельные аналоги.

### Воздушная контактная сеть

Самосвалы с электроприводом, оснащенные токоприемниками (троллейвозы), могут получать энергию от воздушной контактной сети. Использование питания от воздушной контактной сети позволяет уменьшить массу самосвала на 10–15 % за счет исключения дизельного двигателя, топливного и масляного баков, масляного и водяного радиаторов, систем отвода отработавших газов и ряда других при сохранении той же грузоподъемности.

а б

**Рисунок 2. Электроаккумуляторные карьерные самосвалы BYD V60 – а и Komatsu HD 605-7 – б.**
**Figure 2. BYD V60 mining trucks with electric accumulators – a; Komatsu HD 605-7 – б.**

Применение троллейвозов позволяет не только исключить затраты на закупку, хранение и транспортировку дизельного топлива, но и повысить скорость движения самосвала и уменьшить расходы на вентиляцию выработок. Обычно скорость самосвала на уклоне ограничена мощностью дизельного двигателя. Возможность использования большей мощности позволяет самосвалу с электроприводом двигаться с большей скоростью и преодолевать более крутые уклоны, что обеспечивает сокращение времени транспортного цикла, а способность этих машин перемещаться по выработкам с уклоном 12° со скоростью до 24 км/ч существенно расширяет область использования электротранспорта [8]. Например, если время рабочего цикла уменьшается на 20 % в результате увеличения скорости на подъемах, то парк из 32 самосвалов-троллейвозов способен обеспечить те же результаты, что и 40 самосвалов, работающих на дизельном топливе [1, 9, 10]. В марте 2013 г. на крупнейшей медной шахте в Африке Kansanshi (Кансанши) дизельный автопарк был полностью заменен на троллейвозы Hitachi EH3500ACII.

Слабым местом этой технологии является ее ограниченная мобильность, операционная гибкость и высокие капитальные затраты. Для обеспечения работы требуется проложить троллейную трассу, к тому же ввиду «роста» карьера по мере выработке полезного ископаемого трассу необходимо будет время от времени перемещать и дополнять новыми участками. Трасса должна быть обеспечена необходимым количеством тяговых подстанций и основным источником питания сети, а также быть удалена от места производства взрывов на 300–600 м. Троллейвозам также требуется несколько более широкое пространство для маневра, чем эквивалентным дизельным машинам. Кроме того, высоковольтные провода во время загрузки и разгрузки троллейвоза находятся достаточно близко, и создается опасность их повреждения. Стоимость инфраструктуры составляет около 75 % от цены троллейвоза.

Питание автотранспортных средств от воздушной контактной сети представляет собой привлекательную альтернативу для подземных и карьерных самосвалов, особенно при работе на длинных пандусах. Наилучшие результаты могут быть достигнуты в случае перемещения горной массы на расстояния, превышающие 1500 м, особенно когда дорога для перевозки должна использоваться в течение нескольких лет и объем транспортируемой горной массы составляет более 500 000 т в год. Основываясь на производственном опыте, можно сказать, что троллейвозы могут быть интересной альтернативой для существующих шахт и карьеров. Согласно проведенным расчетам [9, 11], срок окупаемости системы с учетом повышения производительности карьерных самосвалов в троллейном режиме может составить 1–2 года. Кроме того, отсутствует дизельный выхлоп и, следовательно, загазованность и образование тумана в карьере или выработке.

### Бортовой аккумулятор

Основные преимущества транспортных средств, работающих на аккумуляторах, – это их универсальность, энергоэффективность, хорошее тяговое усилие (включая высокий крутящий момент при низких скоростях), отсутствие вредных выбросов, снижение потребности в вентиляции, снижение эксплуатационных расходов, хорошая перегрузочная способность, меньшая потребность в техническом обслуживании и более высокая производительность. К сожалению, их мобильность ограничена малой емкостью аккумуляторов: у свинцовых аккумуляторов примерно144 кДж/кг, а у более эффективного аккумулятора на основе фосфата лития железа ($LiFePO_4$) или LFP – 396 кДж/кг. Более эффективные литий-ионные батареи имеют до 900 кДж/кг [6], но они пока не применяются для транспортных средств.

Параметры ряда аккумуляторов могут обеспечить необходимый запас энергии для выполнения вспомогательных операций транспортного цикла самосвала. Например, при питании от электролитической никель-кадмиевой аккумуляторной батареи (АКБ) энергоемкостью 250 МДж самосвал БелАЗ-7530 грузоподъемностью 220 т способен проехать 3,6 км [12].

Аккумуляторные грузовики-погрузчики выпускаются канадской компанией RDH Mining Equipment. Грузовик-погрузчик Muckmaster 300EB с емкостью ковша 2 м$^3$ и 20-тонный грузовик Haulmaster 800-20EB питаются от LFP батареи. С 2013 г. четыре Muckmaster 300EB и один Haulmaster 800-20EB работают на золотом руднике Macassa (Макасса) – озеро Киркленд, Онтарио, Канада [6]. Главное преимущество погрузчиков и грузовиков с аккумуляторной батареей – это их экологическая чистота (нет выделения отработанных газов) и мобильность (не связаны с какой-либо постоянной инфраструктурой).

К недостаткам аккумуляторов можно отнести непродолжительный срок эксплуатации и небольшой запас хода в сравнении с ДВС. Согласно информации компании RDH Mining Equipment, LFP батареи позволяют грузовикам-погрузчикам и грузовикам работать в среднем в течение 4 ч. Это меньше, чем продолжительность рабочей смены, которая обычно составляет от 8 до 12 ч. Другими недостатками являются высокий вес аккумуляторов и их стоимость (хранение

**Рисунок 3. Электроаккумуляторный 40-тонный самосвал компании Artisan Vehicles.**
**Figure 3. 40-ton mining truck with electric accumulators by Artisan Vehicles.**

1 Вт · ч стоит примерно 1 евро) [7]. Однако следует учитывать возможность переработки аккумуляторов после окончания срока эксплуатации.

Несмотря на это, имеется значительный интерес к применению этой технологии к подземным транспортным средствам шахт. В тех случаях, когда спрос на вентиляцию и обогрев является серьезной проблемой, выбор этих транспортных средств может быть оправданным. Кроме того, при постоянном прогрессе в технологии изготовления батарей следует ожидать увеличения их энергоемкости, что значительно повысит их привлекательность для применения в горной промышленности.

Китайский концерн BYD Co. разработал трехосный карьерный самосвал полной массой 60 т и габаритной шириной 3,2 м. Самосвал BYD V60 с колесной формулой 6 × 4 рассчитан для работы в угольных разрезах, а также плохо продуваемых карьерах (рис. 2, а). Грузоподъемность машины составляет только 30 т из-за огромной снаряженной массы в 30 т. Только на АКБ и тяговые электродвигатели уже приходится 10 т. Полезный объем кузова составляет 30 м$^3$.

Следующим и более лучшим вариантом является самосвал Komatsu HD 605-7 (рис. 2, б) весом 45 т и грузоподъемностью 65 т, электромоторы которого питаются от аккумуляторных никель-марганец-кобальтовых батарей общей емкостью 700 кВт · ч и весом 4,5 т. Батареи поставляются китайской фирмой ShenzenWestart. Электродвигатели Komatsu 605 HD обеспечивают крутящий момент 1000 Н · м. Самосвал оборудован системой рекуперативного торможения, которая за короткую поездку способна подзарядить батарею на 40 кВт · ч. В процессе эксплуатации 110-тонный самосвал будет не только потреблять электроэнергию, но и отдавать в сеть до 200 кВт лишней энергии при необходимости в течение ночи. Эти электросамосвалы уже работают на цементном карьере возле горы Шассераль в Швейцарии с конца 2017 г.

Калифорнийская фирма Artisan Vehicles представила новый электрический грузовик Z40 грузоподъемностью 40 т, предназначенный для подземных работ (рис. 3). Он оснащен четырьмя электродвигателями и системой обмена аккумуляторными батареями для облегчения смены батарейного блока.

По данным компании Artisan Vehicles, мощность Z40 благодаря электрической трансмиссии почти в два раза больше мощности аналогичного дизельного или бензинового грузовика. Новинка выделяет только 1/8 тепла от его дизельного аналога, не производя при этом выбросов $CO_2$. Электросамосвалы Z40 используются на руднике Kirkland Lake Gold и вывозят значительно больше руды в каждом грузовике, что позволило уменьшить общее количество транспортных средств.

### Топливные элементы

В топливных элементах нет движущихся частей, их отличают надежность, долговечность и простота эксплуатации. КПД топливных элементов уже сейчас составляет 50–70 %, что намного больше, чем у ДВС, и является важным преимуществом перед современными двигателями на нефтяном топливе [13, 14]. Одной из наиболее перспективных разработок в данной сфере является водородный двигатель. В отличие от современных нефтяных источников энергии, водород не дает никаких вредных выбросов в атмосферу и является самым экологически чистым. По сравнению со свинцово-кислотными АКБ, которые сегодня используются в большинстве электроприводов, водородные топливные элементы не нуждаются в частой и длительной зарядке батареи – достаточно периодически следить за наличием водорода в системе и проводить ее дозаправку.

Помимо очевидных достоинств, водородные топливные элементы имеют и определенные недостатки. Самый основной из них – высокая стоимость, что связано с использованием дорогих металлов платиновой группы. Второй недостаток – это габариты и вес, превышающие соответствующие параметры современных ДВС из-за большего количества необходимых узлов и агрегатов. Третья проблема – отсутствие водородных заправок. Кроме того, еще окончательно не отработана технология их изготовления.

Однако прогресс не стоит на месте, и появляются решения данных проблем. В скором времени водород сможет заменить бензин, дизельное топливо и газ, а топливные элементы будут использоваться в качестве основного силового агрегата карьерных самосвалов [15].

Компания Nuvera (штат Массачусетс, США) специализируется на производстве и внедрении водородных топливных элементов, которые используются для электрических погрузчиков Yale. Компанией Sandia National Laboratories/

СА разработан подземный транспортный тягач, силовая установка которого представляет собой батарею из топливных элементов на основе протонных обменных мембран в сочетании с обратимым металлогидридным аккумулятором. Тягач прошел промышленные испытания на безопасность в наземным условиях и показал низкие паразитные потери мощности, низкий уровень шума и высокую экологическую чистоту [16].

### Дизель-генератор

Основным недостатком механических трансмиссий является ступенчатое изменение скорости, а также исчезновение тягового усилия вследствие разрыва силового потока в трансмиссии при переключениях передач. Некоторое устранение этих недостатков обеспечивается установкой на входе коробки передач гидротрансформатора, а внутри ее – фрикционных муфт, обеспечивающих переключение передач под нагрузкой. Однако гидромеханические трансмиссии имеют свои недостатки: они сложнее, дороже, тяжелее и имеют меньший коэффициент полезного действия, чем механические трансмиссии. Применение электромеханической трансмиссии позволяет избежать недостатков механических и гидромеханических трансмиссий. Кроме того, за счет исключения коробки передач с гидротрансформатором и насосом, дифференциала с карданной передачей, многодискового рабочего тормоза с его системой охлаждения снижаются эксплуатационные затраты на техническое обслуживание, ремонт и расходные материалы.

Силовой блок с электромеханической трансмиссией (ЭМТ) состоит из дизельного двигателя, вращающего тяговый генератор переменного тока, двух электромоторов-колес, блока резисторов динамического торможения. Система управления обеспечивает работу и контроль состояния всех компонентов тягового электропривода. Современная система управления обеспечивает возможность воздействия не только на тяговый электропривод, но и на дизельный двигатель, что позволяет формировать тяговые характеристики ЭМТ, оптимально сочетаемые с характеристиками дизельного двигателя. В результате снижается расход топлива при работе самосвала.

В настоящее время из-за своей ненадежности и дороговизны в эксплуатации двигатели постоянного тока практически не используются в промышленности. Использование асинхронных моторов дает возможность снизить удельные объем и массу тяговых электродвигателей, обеспечить более высокую частоту вращения и таким образом увеличить максимальную скорость самосвалов.

Другим достоинством электроприводов переменно-переменного тока является отсутствие щеточно-коллекторного узла в тяговых электродвигателях, что позволяет значительно уменьшить эксплуатационные затраты на их обслуживание. Электрические машины обычно рассчитывают на повышенную максимальную угловую скорость, которая на переменном токе ограничивается в основном механической прочностью ротора и подшипниковых узлов.

Применение тягового электропривода с частотно-регулируемым асинхронным электроприводом по сравнению с гидромеханической трансмиссией позволяет повысить надежность самосвала, снизить стоимость жизненного цикла и одного тонно-километра перевозок. Это достигается за счет повышения ресурса работы элементов электромеханической и преобразовательной части привода, увеличения тягового и тормозного усилий, расширения скоростного диапазона их эффективного действия, повышения максимальной скорости движения груженого самосвала и эффективности электропривода в целом. Использование тормозных резисторов общей мощностью 2,4 МВт позволяет удерживать постоянную скорость 15 км/ч на 16 %-ном спуске, что способствует увеличению производительности самосвала [17].

Дополнительное преимущество – существенное повышение качества управления самосвалом практически во всех режимах движения, в том числе в сложных метеорологических условиях и на скользкой дороге. В таких условиях электромеханика всегда ведет себя лучше, чем гидромеханика, потому что на подъемах электродвигатели позволяют работать трансмиссии без пробуксовки, а торможение электродинамикой на виражах и спусках происходит без блокировки колес.

За последние 20 лет были достигнуты значительные успехи в технологии производства карьерных самосвалов с электроприводом. В сегменте карьерных самосвалов представлены новинки компаний Caterpillar, Komatsu, Libher, Hitachi и «БелАЗ» грузоподъемностью от 90 до 420 т. Все машины оснащены электромеханической трансмиссией переменно-переменного тока. На БелАЗе-75131 используется электротрансмиссия переменно-постоянного тока собственного производства, но на некоторых других самосвалах стоит продукция General Electric или петербургской ОАО «Электросила». На карьерном самосвале БелАЗ-75601 установлен асинхронный двигатель Siemens. Компания Libher применяет собственные разработки и производит все компоненты комплекта тягового электрооборудования, тогда как Komatsu использует продукцию фирмы General Electric.

Компания Siemens планирует в следующем году выпустить карьерный самосвал с ЭМТ переменно-переменного тока грузоподъемностью 30–40 т. Причем рассматривается возможность применения гибридной силовой установки: ДВС и накопитель энергии.

### Транспортные средства с комбинированной (гибридной) силовой установкой

С ростом глубины карьеров увеличиваются средневзвешенный уклон автодорог и расстояние транспортирования, возрастают нагрузки на энергосиловую установку и трансмиссию самосвала. Вместе с тем увеличивается время движения порожнего самосвала, а значит время «непроизводительной» работы двигателя внутреннего сгорания на частичных нагрузках. На вспомогательных операциях транспортного цикла (40–60 % времени рейса) расход топлива составляет 5–15 % от общего расхода за транспортный цикл.

Работа автосамосвала в карьере имеет циклический характер: погрузка–движение в грузовом направлении – разгрузка–движение в порожнем направлении. Наиболее продолжительные составляющие времени рейса – движение с грузом на подъем, при котором самосвал запасает потенциальную энергию, и движение порожняком при спуске, когда накопленная потенциальная энергия рассеивается в виде тепла в тормозных устройствах самосвала. Если при спуске самосвала в карьер рекуперировать энергию торможения и запасать ее в накопителе энергии, то при маневрировании в карьере, погрузке и во время движения в рабочей зоне тяговые двигатели будут использовать запасенную в накопителе энергию, а ДВС будет выключен. Таким образом, можно экономить топливо, увеличить ресурс дизельного двигателя и снизить объемы выбросов отработанных газов.

**Рисунок 4. Подземный дизель-троллейвоз EMT-35.**
**Figure 4. Underground diesel-trolley car EMT-35.**

Одним из вариантов является применение на транспортном средстве гибридной или комбинированной энергосиловой установки (КЭУ). Транспортные средства с гибридной энергосиловой установкой объединяют традиционный дизельный или бензиновый двигатель с бортовой перезаряжаемой системой хранения энергии для достижения лучшей экономии топлива и не ограничены областью нахождения зарядного устройства [2, 18]. При этом ДВС может быть меньше, легче и эффективнее, чем у обычного автомобиля, потому что он рассчитывается на средние затраты энергии, а не на пиковые значения. При этом ДВС и электродвигатель (ЭД) работают параллельно на общий вал. Высокий крутящий момент дизельного двигателя в сочетании с гибридной технологией может обеспечить значительно больший пробег. Причем в основном работает ЭД с питанием от аккумулятора, а ДВС используется для зарядки аккумулятора и для получения максимальных тягово-скоростных показателей при разгоне, движении на повышенных скоростях и в тяжелых дорожных условиях. Современные гибридные электромобили продлевают заряд своих батарей через рекуперативное торможение.

Транспортные средства с комбинированной энергосиловой установкой оборудованы двумя видами силовых установок, которые работают независимо и последовательно [19].

Карьерные самосвалы с дизельным двигателем и электродвигателем, получающим питание от воздушной контактной сети, или дизель-троллейвозы, успешно эксплуатируется в странах Африки, в Бразилии и США. Например, на золоторудном карьере «Бетце» (США, штат Невада) используется парк из 73 дизель-троллейвозов грузоподъемностью 170 т, которые ежедневно перевозят 410 тыс. т горной массы. Троллейвозы успешно работают на шахтах и карьерах в Конго – карьер Lubembashi, Намибии – бассейн Россинга (Rossing) в пустыне Намиб, на медных рудниках Гега вблизи Лубумбаши в Заире с 1986 г. В конце 1980-х гг. карьерные дизель-троллейвозы начали эксплуатировать в Канаде, Швеции и Австралии [9, 10]. Для транспортировки угля из разреза Grivice в RMU Banovici (Босния и Герцеговина) глубиной более 100 м используются карьерные дизель-троллейвозы Euclid-Hitachi EH4500 AC грузоподъемностью 254 т.

Компания Atlas Copco выпускает две модели подземных дизель-троллейвозов: 35- и 50-тонный грузовики EMT-35 (рис. 4) и EMT-50 соответственно.

Это низкопрофильные шарнирно сочлененные грузовики с мотор-колесами, приводы которых питаются от трехфазных линий переменного тока напряжением 690 В. Для обеспечения достаточной мобильности грузовик оснащен дизель-генераторной установкой, позволяющей ему загружаться, работать и разгружаться, пока он не подключен к линии электропередачи. Поскольку вспомогательный дизельный двигатель относительно небольшой по сравнению с основными электродвигателями (72 кВт против 2 · 200 кВт у EMT-35 и 107 кВт против 2 · 355 кВт у EMT-50), потребности в вентиляции для этих грузовиков намного ниже, чем для обычных автомобилей с дизельным двигателем. Грузовик EMT-50 потребляет менее 17 % объема воздуха, необходимого для работы и эвакуации выхлопных газов и паров, испускаемых аналогичным 50-тонным дизельным грузовиком [6].

Наиболее важным преимуществом этих грузовиков является их высокая перегрузочная способность и очень хорошая проходимость. На уклоне 14° скорость дизель-троллейвоза на подъеме почти вдвое выше по сравнению с аналогичной дизельной машиной.

Канадский Консорциум R&D разработал дизель-электрический погрузчик-грузовик для подземных горных работ [10], получив экономичное решение между минимальным объемом выбросов и расходом дизельного топлива. Погрузчик с объемом ковша 1,2 м$^3$ на базе модели LT-270 изготовлен канадской компанией MTI (Садбери, Онтарио). Результаты испытаний, проведенных в 2010 г. [16], показали, что объем выбросов в зависимости от режима работы снизился на 12–64 %, а расход топлива уменьшился на 10 %.

Гибридные и комбинированные энергосиловые установки являются одним из возможных средств ускорения внедрения ресурсо- и энергосберегающих технологий и повышения экологической безопасности в горной промышленности.

## Заключение

Повышение эффективности работы горного предприятия может достигаться за счет значительной экономии топлива, повышения производительности процесса транспортирования горной массы, сокращения автопарка, уменьшения расходов на эксплуатацию и техническое обслуживание. Электропривод позволяет увеличить межремонтные интервалы двигателя и снизить затраты на потребляемую энергию за счет регенерации и возвращения ее в сеть.

При оценке эффективности применения электротранспорта решающую роль играет соотношение цен на дизельное топливо и электроэнергию. Существенное значение имеет сам факт экономии топлива, который по расчетам составляет 0,9–1,1 кг на 1 м$^3$ транспортируемой горной массы, т. е. в среднем 1 тыс. т топлива на 1 млн м$^3$ перевозок. Благоприятным следствием этого является соответствующее сокращение выбросов вредных веществ в атмосферу.

Радикальным вариантом может быть применение контактно-аккумуляторных самосвалов, движение которых в глубинной части карьеров и в забоях будет осуществляться с помощью аккумуляторных батарей, а при выезде из карьера – с помощью контактной сети. Аккумуляторы по сравнению с ДВС незначительно увеличивают массу самосвала.

Каждая технология подачи питания на электропривод предполагает снижение выбросов выхлопных газов и более широкое использование возобновляемой энергии. Согласование конкретных электрических и горнодобывающих технологий поможет преодолеть имеющиеся барьеры, такие как дальность транспортирования, наличие соответствующей инфраструктуры и времени подзарядки. Использование комбинированных энергосиловых установок позволяет уменьшить расход электрической энергии, дизельного топлива и трудовых затрат, повысить экологическую безопасность автотранспортных средств при подземной и открытой добыче полезных ископаемых.

В настоящее время рынок электрогрузовиков еще находится на ранних стадиях, но исследования в области технологий, необходимых для обеспечения электрической энергии различных видов электрогрузовиков, продолжаются. Важно понимать, что одна модель электрогрузовиков не может универсально подходить во всех случаях из-за широкого спектра горнотехнологических условий.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Шешко О. Е. Эколого-экономическое обоснование возможности снижения нагрузки на природную среду от карьерного транспорта // ГИАБ. 2017. № 2. С. 241–252.
2. Степаненко В. П. Применение в горной промышленности КЭСУ с возобновляемыми источниками и накопителями энергии // ГИАБ. 2016. №. 9. С. 138–146.
3. Козырев С. А., Амосов П. В. Пути нормализации атмосферы глубоких карьеров // Вестник МГТУ. 2014. Т. 17, № 2. С. 231–237.
4. Koptev V. Y., Kopteva A. V. Structure of energy consumption and improving open-pit dump truck efficiency // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2017. Vol. 87, №. 2. 022010.
5. Jacobs W., Hodkiewicz M. R., Bräunl T. A Cost–Benefit Analysis of Electric Loaders to Reduce Diesel Emissions in Underground Hard Rock Mines // IEEE Transactions on industry applications. 2015. Vol. 51, № 3. P. 2565–2573.
6. Paraszczak J., Svedlund E., Laflamme M. Electrification of loaders and trucks – a step towards more sustainable underground mining: ICREPQ'14 // Renewable Energy and Power Quality Journal (RE&PQJ). 2014. Vol. 1, № 12. P. 81–86. https://doi.org/10.24084/repqj12.240
7. Barthel J., Jung K., Seewig J. High-voltage DC trailing cable systems for mobile machinery // IECON 2015: 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. 2015. P. 001145–001151. https://doi.org/10.1109/IECON.2015.7392254
8. Славиковский О. В., Митрошин Г. Н. Подземный транспорт при комбинированной геотехнологии // ГИАБ. 2011. № 5. С. 88–93.
9. Mazumdar J. All electric operation of ultraclass mining haul trucks // Conference Record – IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society). 2013. P. 1–5. http://dx.doi.org/10.1109/IAS.2013.6682568
10. Varaschin J., De Souza E. Economics of diesel fleet replacement by electric mining equipment // 15th North American Mine Ventilation Symposium. Blacksburg, Virginia, June 21–25, 2015.
11. Степук О. Г., Зуёнок А. С. Дизель-троллейвозный транспорт БелАЗ: перспективы использования в горном производстве // Горный журнал. 2013. № 1. С. 52–55.
12. Хазин М. Л., Тарасов П. И., Тарасов А. П. Расчет накопителей энергии для карьерных контактно-аккумуляторных троллейвозов // Актуальные вопросы машиноведения. 2015. Т. 4. С. 91–93.
13. Kukkonen S. Energy consumption analysis of battery electric vehicles in underground environments // Underground Mining Technology. 2017. P. 569–580.
14. Demers M., Labelle D., Wilson R., Matikainen O. Hybrid Underground Loader-2010 // Project Update // MDEC Conference, October 5–8, Toronto, Ont., Canada, 2010.
15. Марков В. А., Сивачев В. М., Сивачев С. М. и др. Топливные элементы для транспорта // Грузовик. 2016. №. 3. С. 13–19.
16. Miller A. R., Berg G., Barnes D. L., Eisele R. I., Tanner D. M., Vallely J. M., Lassiter D. A. Fuel cell technology in underground mining // 5th SAIMM International Platinum Conference. Sun City, South Africa, 17–21 September 2012. P. 533–545.
17. Трухнов Л. И., Насковец А. М. Самосвалы серии БелАЗ-7558 грузоподъемностью 90 т с электромеханической трансмиссией переменного тока // Горная промышленность. 2016. № 2 (126). С. 14–17.
18. Zhang R., Meng K. Driving Force Coordinated Control of Separated Axle Hybrid Electric Dump Truck // SAE Technical Paper. 2017. https://doi.org/10.4271/2017-01-2462.
19. Тарасов П. И., Журавлев А. Г., Исаков М. В. Вопросы создания и перспективы применения карьерных автосамосвалов с комбинированной энергосиловой установкой // Горная промышленность. 2008. № 3. С. 68–75.

*Статья поступила в редакцию 6 октября 2018 г.*

УДК 629.353 https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-1-128-135

# Electric trucks for underground and open pit mining

**Mark Leont'evich Khazin**[1,*]

Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia

***Purpose of the work*** is to increase the energy saving of a mining enterprise by using electricity and reducing the cost of diesel fuel.
***Methodology of the work.*** Analysis of possible ways for energy saving of a mining enterprise.
***Results of the work.*** The extraction industry is one of the main consumers of energy, therefore, mining companies put a greater emphasis on energy saving measures and cost-effective ways of energy generation. One of the largest expenditure item when mining is the energy required for extraction and processing of mineral ores. While the development of mineral deposits, the main type of technological transport is a motor vehicle with diesel engines. The global extraction industry spends billions of liters of diesel fuel annually to transport rock mass. Along with many advantages, diesel engines have some disadvantages as well. One of the promising areas of energy saving of a mining enterprise is the use of electricity. This leads to savings in diesel fuel and reduced exhaust emissions. Five main ways of power supply to an engine are considered: additional power cable, air contact network, built-in battery, fuel cells, electric generator, and trucks with a combined power plant.
***Conclusions.*** Improving the efficiency of the mining enterprise can be achieved through significant fuel savings, higher productivity of the transportation process of rock mass, reduction of vehicle fleet, reduction of operating and maintenance costs. An electric motor drive allows you to increase time between engine repairs, reduce the cost of energy consumed by regeneration and return it to the network, as well as reduce or eliminate emissions of exhaust gases.

*Keywords*: energy saving, electric motor drive, underground mining, open pit mining, dump truck with a combined power plant, ecology.

## REFERENCES

1. Sheshko O. E. 2017, Ecological and economic substantiation of the possibility of waste load reduction from open-cast transport. *Gorny Informatsionno-Analiticheskiy Byulleten* [Mining Informational and Analytical Bulletin], no. 2, pp. 241–252.(*In Russ.*)
2. Stepanenko V. P. 2016, Application of combined power plants in the extraction industry with renewable sources and energy storage. *Gorny Informatsionno-Analiticheskiy Byulleten* [Mining Informational and Analytical Bulletin], no. 9, pp. 138–146. (*In Russ.*)
3. Kozyrev S. A., Amosov P. V. 2014, Ways to normalize the atmosphere of deep open pit. *Vestnik MGTU* [Scientific journal of Murmansk State Technical University], vol. 17, no. 2, pp. 231–237. (*In Russ.*)
4. Koptev V. Y., Kopteva A. V. 2017, Structure of energy consumption and improving open-pit dump truck efficiency. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, vol. 87, no. 2, 022010.
5. Jacobs W., Hodkiewicz M. R., Bräunl T. 2015, A Cost–Benefit Analysis of Electric Loaders to Reduce Diesel Emissions in Underground Hard Rock Mines. *IEEE Transactions on industry applications*, vol. 51, no. 3, pp. 2565–2573.
6. Paraszczak J., Svedlund E., Laflamme M. 2014, Electrification of loaders and trucks – a step towards more sustainable underground mining: *ICREPQ'14. Renewable Energy and Power Quality Journal (RE&PQJ)*, vol. 1, no. 12, pp. 81–86. https://doi.org/10.24084/repqj12.240
7. Barthel J., Jung K., Seewig J. 2015, High-voltage DC trailing cable systems for mobile machinery . IECON 2015: 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, pp. 001145–001151. https://doi.org/10.1109/IECON.2015.7392254
8. Slavikovsky O. V., Mitroshin G. N. 2011, Underground transport with combined geotechnology. *Gorny Informatsionno-Analiticheskiy Byulleten* [Mining Informational and Analytical Bulletin], no. 5, pp. 88–93. (*In Russ.*)
9. Mazumdar J. 2013, All electric operation of ultraclass mining haul trucks. Conference Record – IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society), pp. 1–5. http://dx.doi.org/10.1109/IAS.2013.6682568
10. Varaschin J., De Souza E. 2015, Economics of diesel fleet replacement by electric mining equipment. 15th North American Mine Ventilation Symposium. Blacksburg, Virginia, June 21–25.
11. Stepuk O. G., Zuyenok A. C. 2013, BelAZ diesel-trolley transport: prospects of use in the extraction industry. *Gornyy Zhurnal* [Mining Journal], no. 1, pp. 52–55. (*In Russ.*)
12. Khazin M. L., Tarasov P. I., Tarasov A. P. 2015, Calculation of energy storage for open-pit contact-battery battery-trolley loco. *Aktual'nyye voprosy mashinovedeniya* [General issues of mechanics], vol. 4, pp. 91–93. (*In Russ.*)
13. Kukkonen S. 2017, Energy consumption analysis of battery electric vehicles in underground environments. *Underground Mining Technology*, pp. 569–580.
14. Demers M., Labelle D., Wilson R., Matikainen O. 2010, Hybrid Underground Loader-2010. Project Update. MDEC Conference, October 5–8, Toronto, Ont., Canada.
15. Markov V. A., Sivachev V. M., Sivachev S. M. et al. 2016, Fuel elements for transport. *Gruzovik* [Truck], no. 3, pp. 13–19.
16. Miller A. R., Berg G., Barnes D. L., Eisele R. I., Tanner D. M., Vallely J. M., Lassiter D. A. 2012, Fuel cell technology in underground mining. 5th SAIMM International Platinum Conference. Sun City, South Africa, 17–21 September, pp. 533–545.
17. Trukhnov L. I., A. Naskovets A. M. 2016, Dump trucks of the BelAZ-7558 series with a carrying capacity of 90 tons with an electromechanical transmission of alternate current. *Gornaya promyshlennost'* [Mining industry], no. 2 (126), pp. 14–17. (*In Russ.*)
18. Zhang R., Meng K. 2017, Driving Force Coordinated Control of Separated Axle Hybrid Electric Dump Truck. SAE Technical Paper. https://doi.org/10.4271/2017-01-2462.
19. Tarasov P. I., Zhuravlev A. G., Isakov M. V. 2008, Issues of creation and prospects for the use of mining dump trucks with a combined power plant. *Gornaya promyshlennost'* [Mining industry], no. 3, pp. 68–75. (*In Russ.*)

*The article was received on October 6, 2018*

* ✉ khasin@ursmu.ru
https://orcid.org/0000-0002-6081-4474

УДК 625.32 https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-1-136-142

# Обоснование параметров фрикционного привода агрегатов горно-обогатительного производства

**Игорь Парфенович ТИМОФЕЕВ***,
**Марина Сергеевна СТОЛЯРОВА****

[1]Санкт-Петербургский горный университет, Россия, Санкт-Петербург

***Актуальность работы*** обусловлена возможностью создания фрикционного привода вращающихся частей агрегатов горно-обогатительного производства, в частности сгустителей пульпы, на основе тягового устройства с регулируемым давлением приводных колес на рельс, обеспечивающего линейную зависимость развиваемой силы тяги от внешнего сопротивления, что исключает необходимость использования дополнительных балластных масс, снижает металлоемкость и энергоемкость привода.

***Цель работы:*** обоснование параметров фрикционного привода на основе тягового устройства рычажного типа с регулируемым в функции сопротивления давлением приводных колес, обеспечивающих надежное сцепление колес с кольцевым рельсом в зоне упругого скольжения, исключающих перекос устройства на кольцевом рельсе, продольное скольжение и износ ходовых частей.

***Методология исследования.*** Использован системный подход, включающий аналитические и вычислительные методы с применением математического моделирования, структурного и кинетостатического анализа, а также классические положения теоретической механики и теории механизмов и машин.

***Результаты и их применение.*** Установлены основные зависимости параметров тягового устройства, учитывающие особенности работы на кольцевом рельсе и обеспечивающие надежное сцепление приводных колес с рельсом в зоне упругого скольжения. Фрикционный привод на основе тягового устройства, способный развивать тяговое усилие, независимое от сцепного веса тягового органа, может быть использован в качестве привода сгустителей пульпы с периферийным приводом, а также в качестве привода вращающихся частей крупных агрегатов, таких как цементные печи, мельницы, барабанные сушилки и смесители.

***Выводы.*** Рассмотрены особенности работы тягового устройства фрикционного привода горно-обогатительных агрегатов на кольцевом рельсе, предложены методы устранения возможных перекосов устройства, вызывающих износ ходовых частей привода, а также значения поправочных коэффициентов отношения диаметров приводных колес и геометрических параметров механизма в зависимости от радиусов рабочих поверхностей рельса.

*Ключевые слова*: обогащение, сгуститель, фрикционный привод, кольцевой рельс, тяговое устройство, рычажный механизм.

## Введение

В различных отраслях промышленности широкое применение нашли вращающиеся агрегаты – радиальные сгустители пульпы, мельницы, реакторы, цементные печи и т. п. [1]. Характерной особенностью приводов указанных устройств является наличие в их составе фрикционной пары, образованной приводным роликом и кольцевым рельсом, или открытой зубчатой передачи, а именно шестерни, сидящей на выходном валу редуктора привода и зубчатого венца, закрепленного на корпусе вращающейся части агрегата.

Основной парк эксплуатируемых агрегатов обогатительного производства представлен радиальными сгустителями с центральным и периферийным приводом. В настоящее время в промышленности и коммунальном хозяйстве России и стран СНГ эксплуатируются десятки тысяч сгустителей пульп различного назначения [2].

Анализ литературных источников, патентов на изобретения показал, что модернизация конструкций современных радиальных сгустителей идет в основном по трем направлениям – установка оригинальных питающих колодцев, системы удаления шлама и подачи флокулянта, применение блоков тонкослойного сгущения, а также гребковой системы удаления шлама волокушного типа. Перспективным, по мнению ряда авторов, является реконструкция сгустителей с периферийным приводом в аппараты с центральным приводом [3, 4]. Однако наряду с поиском путей улучшения и оптимизации существующего оборудования и технологических процессов не затрагиваются вопросы совершенствования самого привода.

Фрикционный привод вращающихся частей агрегатов горно-обогатительного производства (сгустителей, реакторов и т. д.) включает, как правило, тяговую тележку с размещенным на ней приводом, соединенную с гребковой фермой и опирающуюся на кольцевой рельс, уложенный по борту приемной чаши сгустителя, приводным роликом [5]. Гребковая ферма приводится во вращение при движении тележки по кольцевому рельсу. При этом тяговая способность привода зависит от силы сцепления ролика с кольцевым рельсом, определяемой весом и силами сопротивления движению гребковой фермы в процессе сгущения, что не создает условий для длительной устойчивой работы агрегата с заданной скоростью вращения гребковой фермы [6]. При перегрузке отмечается замедление скорости вращения фермы, а для возобновления нормальной работы предусмотрена возможность размещения дополнительного балласта [7, 8]. Таким образом, существенным недостатком фрикционных приводов сгустителей и других горно-обогатительных агрегатов, по нашему мнению, является прямая зависимость между создаваемой силой тяги и силой тяжести тягового органа (сцепной вес тяговой тележки, фермы), что приводит к необходимости введения дополнительной, непроизводительно перемещаемой балластной массы, неоправданному росту расходования материалов, повышению энергоемкости привода [9].

Совершенствование фрикционного привода горно-обогатительных агрегатов возможно при изменении способа создания силы тяги за счет полной или частичной замены сцепного веса принудительным прижатием приводных колес к рельсу [10, 11].

* partim@mail.ru
https://orcid.org/0000-0001-9572-0542
**89623463043@mail.ru
https://orcid.org/0000-0003-2539-6032

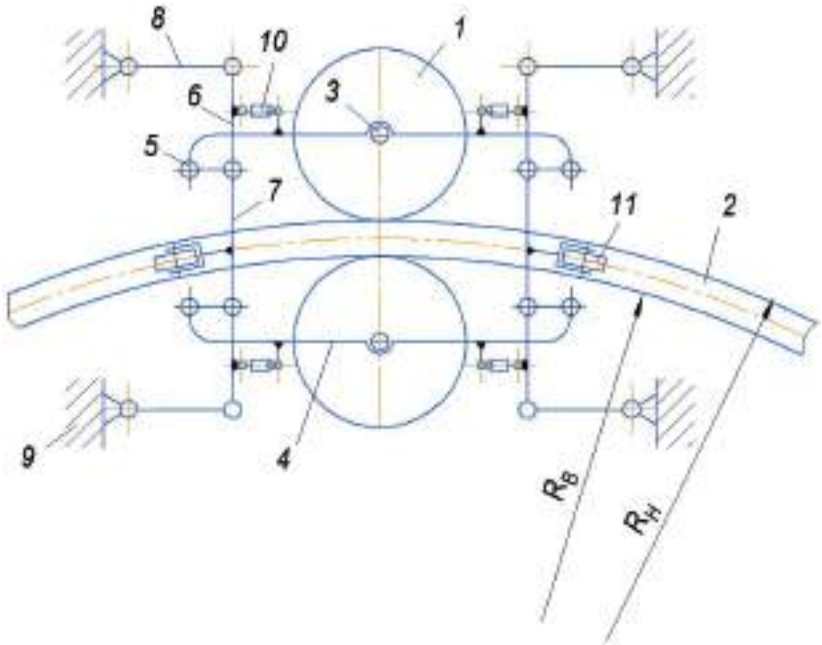



**Рисунок 1. Кинематическая схема тягового устройства.** 1 – приводное колесо; 2 – кольцевой рельс; 3 – ось; 4 – рычаг; 5 – шарнир; 6 – угловой рычаг; 7 – хомут; 8 – тяга; 9 – рама; 10 – приспособление начального затяга; 11 – опорный ролик; $R_в$, $R_н$ – радиусы внутренней и наружной рабочих поверхностей рельса.

**Figure 1. Kinematic diagram of the traction device.** 1 – driving wheel; 2 – ring-type rail; 3 – axis; 4 – lever; 5 – hinge; 6 – crank lever; 7 – clamp; 8 – thrust; 9 – frame; 10 – device for initial tighten force; 11 – supporting roller; $R_в$, $R_н$ – radii of the inner and outer working surfaces of the rail.

## Методология исследования

Альтернативой существующим фрикционным приводам сгустителей может стать периферийный фрикционный привод с регулируемой в функции сопротивления силой тяги, реализованный на основе тяговых устройств [12], созданных в Ленинградском горном институте под руководством проф. В. С. Берсенева.

Кинематические и конструктивные особенности нового привода состоят в том, что вращательное движение гребковой фермы создается тяговым устройством (рис. 1) с регулируемым в функции сопротивления давлением приводных колес на рельс, которое обеспечивает надежное сцепление колес с кольцевым рельсом в зоне упругого скольжения.

Тяговое устройство (рис. 1) представляет собой плоский шарнирно-рычажный механизм с двумя горизонтально расположенными цилиндрическими приводными (тяговыми) колесами 1, зажимающими головку кольцевого рельса 2 во встречных направлениях. Приводные колеса 2 посредством осей 3 смонтированы на рычагах 4, соединенных шарнирами 5 с концами коротких плеч угловых рычагов 6. Вершины угловых рычагов 6 связаны с огибающими кольцевой рельс 2 хомутами 7, а концы длинных плеч тягами 8 соединены с рамой 9 тяговой тележки вращаемого агрегата. Рычаги 4 приводных колес снабжены пружинными приспособлениями начального затяга 10, а хомуты 7 – опорными роликами 11, передающими силу тяжести тягового устройства на кольцевой рельс 2. При сообщении вращательного движения приводным колесам 1 происходит затяг механизма и за счет сил сцепления колес с рельсом вращение передается поворотной части агрегата (например, гребковой ферме сгустителя), при этом нормальные давления приводных колес и реакции кольцевого рельса взаимно уравновешены. Нормальное давление тяговых колес 1 на рельс 2 изменяется автоматически в зависимости от сопротивления вращающейся части агрегата. Приводные колеса могут зажимать как головку рельса, так и его стойку, при этом нормальные давления приводных колес и реакции кольцевого рельса взаимно уравновешены.

Однако при работе тягового устройства на кольцевом рельсе, плоскость оси головки которого совпадает с плоскостью вращения приводных колес, возможен перекос тягового устройства относительно оси рельса [13], причинами которого являются:

– несоответствие окружных скоростей тяговых колес длинам окружностей внутренней $R_в$ и наружной $R_н$ рабочих поверхностей головки рельса;

– несовпадение по направлению создаваемой тяговым устройством силы тяги и внешнего сопротивления (реакция вращающейся части агрегата);

– перераспределение нагрузок между внутренней относительно кольцевого рельса и наружной частями тягового устройства.

При перекосе тягового устройства в плоскости вращения приводных колес возникают дополнительные сопротивления от продольного скольжения, ведущие к интенсивному износу рабочих поверхностей приводных колес и рельса к снижению коэффициента полезного действия привода.

Методы устранения продольного скольжения зависят от типа привода тяговых колес. Применение дифференциальной передачи позволяет полностью устранить продольное скольжение, однако ведет к значительному усложнению конструкции тягового устройства и привода в целом. В практике проектирования тяговых устройств наибольшее распространение получили приводы с жесткой кинематической связью приводных колес [14, 15] и индивидуальные при-

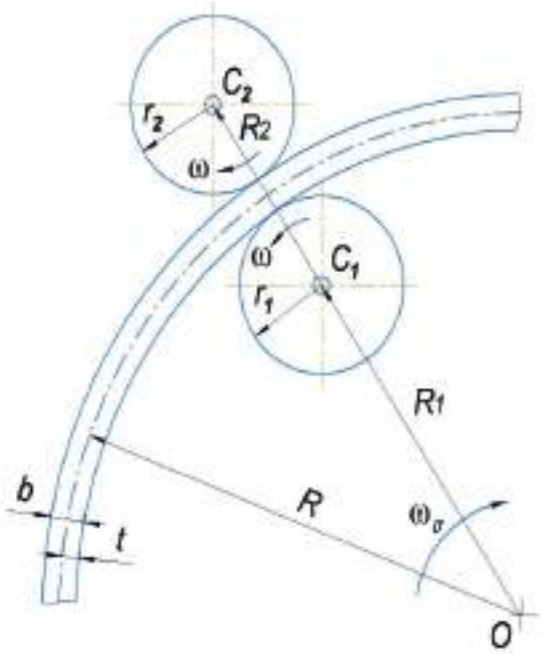



**Рисунок 2. Схема расположения приводных колес на кольцевом рельсе.** *B* – ширина головки рельса; *t* – половина ширины головки рельса; $r_1$, $r_2$ – радиусы приводных колес; ω – угловая скорость приводных колес; $\omega_0$ – угловая скорость гребковой фермы; *R* – средний радиус кольцевого рельса; *O* – центр кольцевого рельса (центр вращения фермы).

**Figure 2. The scheme of driving wheels on the ring-type rail.** B – width of the railhead; t – half the width of the railhead; $r_1$, $r_2$ – radii of driving wheels; ω – angular rate of driving wheels; $\omega_0$ – angular rate of the rowing farm; *R* – average radius of revolving arms; O – center of the ring-type rail (center of rotation of revolving arms).

воды с одинаковыми параметрами двигателей и передач. Колеса 1, размещенные на раме тяговой тележки (на рис. 1 не показаны), приводятся во вращательное движение электродвигателем через раздвоенную червячную передачу. При рассмотрении особенностей работы на кольцевом рельсе фрикционного привода с тяговым устройством последующие выводы основаны на предположении, что на приводные колеса при равенстве угловых скоростей $\omega_1 = \omega_2 = \omega$ действуют равные крутящие моменты.

На рис. 2 представлена схема расположения приводных колес на кольцевом рельсе.

В расчетном режиме движения системы векторы $\overline{OC_1}, \overline{OC_2}$ коллинеарны:

$$\overline{OC_1} = R_1, \overline{OC_2} = R_2,$$

где $R_1$, $R_2$ – расстояние от центра кольцевого рельса до центров приводных колес, расположенных на внутренней и внешней рабочих поверхностях рельса соответственно.

При движении тягового устройства по кольцевому рельсу окружные скорости приводных колес равны:

$$r_1\omega = \omega_0 R_1,\ r_2\omega = \omega_0 R_2,$$

где $r_1$, $r_2$ – радиусы приводных колес, расположенных на внутренней и внешней рабочих поверхностях рельса соответственно, м; ω – угловая скорость приводных колес при жестком приводе, $с^{-1}$; $\omega_0$ – угловая скорость гребковой фермы, $с^{-1}$.

Угловая скорость приводных колес:

$$\omega = \frac{\omega_0 + R_1}{r_1} = \frac{\omega_0 + R_2}{r_2}.$$

Радиусы приводных колес $r_1$, $r_2$ должны быть пропорциональны радиусам $R_1$, $R_2$:

$$\frac{r_2}{r_1} = \frac{R_2}{R_1} = K, r_2 = Kr_1,$$

где *K* – коэффициент отношения радиусов приводных колес, расположенных на внутренней и внешней рабочих поверхностях рельса.

Из расчетной схемы (рис. 2):

$$R_1 = R - r_1 - t;\ R_2 = R + r_2 + t,$$

где *R* – средний радиус кольцевого рельса; *t* – половина ширины головки рельса.

Коэффициент отношения радиусов приводных колес:

$$K = \frac{R + r_2 + t}{R - r_1 - t} = \frac{R + Kr_1 + t}{R - r_1 - t}. \quad (1)$$

После соответствующих преобразований (1) окончательно получаем коэффициент $K$, связывающий параметры кольцевого рельса $R$, $t$ и радиус $r_1$ приводного колеса расположенного на внутренней поверхности кольцевого рельса:

$$K = \frac{1 + (t/R)}{1 - 2(r_1/R) - (t/R)}.$$

Диаметры приводных колес, контактирующих с внутренней и наружной рабочими поверхностями кольцевого рельса равны:

$$D_1 = 2r_1;\ D_2 = KD_1.$$

Так как длина пути, проходимого колесом с внешней стороны кольцевого рельса, больше пути, проходимого колесом по внутренней поверхности, то для устранения продольного скольжения, вызванного несоответствием окружных скоростей приводных колес длинам окружностей внутренней $R_в$ и наружной $R_н$ рабочих поверхностей головки рельса, необходимо диаметры $D_1$ и $D_2$ приводных колес принимать пропорциональными соответствующим радиусам. Так как $R_н = R + t > R_в = R - t$, то диаметр наружного колеса $D_2$ должен быть принят меньшим, чем диаметр внутреннего колеса $D_1$, и равным $D_2 = KD_1$.

На рис. 3 представлен график зависимости коэффициента отношения диаметров приводных колес от диаметра кольцевого рельса при движении тягового устройства по рельсам Р50, Р65 при зажатии стойки рельса толщиной 16 и 18 мм и по рельсам Р50, Р65 при зажатии головки рельса шириной $b$ =75 мм. Диаметр кольцевого рельса принимался равным диаметру чана сгустителей пульпы от 18 до 100 м.

Анализ результатов показывает, что коэффициент отношения диаметров приводных колес тягового устройства резко возрастает для значений диаметра кольцевого рельса от 18 до 40 м при условии работы тягового устройства на головке кольцевого рельса. При значениях диаметра рельса от 40 до 100 м наблюдается более пологая зависимость. Максимальное значение коэффициента отношения диаметров приводных колес получено при работе тягового устройства на стойке кольцевого рельса с диаметром, равным 100 м.

Перекос тягового устройства на кольцевом рельсе может быть вызван также несовпадением направления создаваемой тяговым устройством силы тяги и внешним сопротивлением (реакция вращающейся части агрегата). Для обеспечения равновесия системы необходимо, чтобы линия действия равнодействующей $T$ тяговых усилий $T_н$ и $T_в$ совпадала с направлением равнодействующей сил внешнего сопротивления.

На рис. 4 представлена схема сил, действующих на элементы тягового устройства.

Из условия равновесия моментов сил:

$$\left(\frac{b}{2} + \Delta R\right) T_н = b' T_в;$$

$$b' = \left(\frac{b}{2} + \Delta R\right)\frac{T_н}{T_в} = \left(\frac{b}{2} + \Delta R\right) K;\ \Delta R = \frac{b}{2} - b'.$$

Если ширина головки рельса $b = R_н - R_в$, то равнодействующая $T$ тяговых усилий $T_н$ и $T_в$ (реакции рельса) будет смещена от оси головки рельса к центру кольцевого рельса на величину $\Delta R$:

$$\Delta R = \frac{b^2}{2R_н}. \quad (2)$$

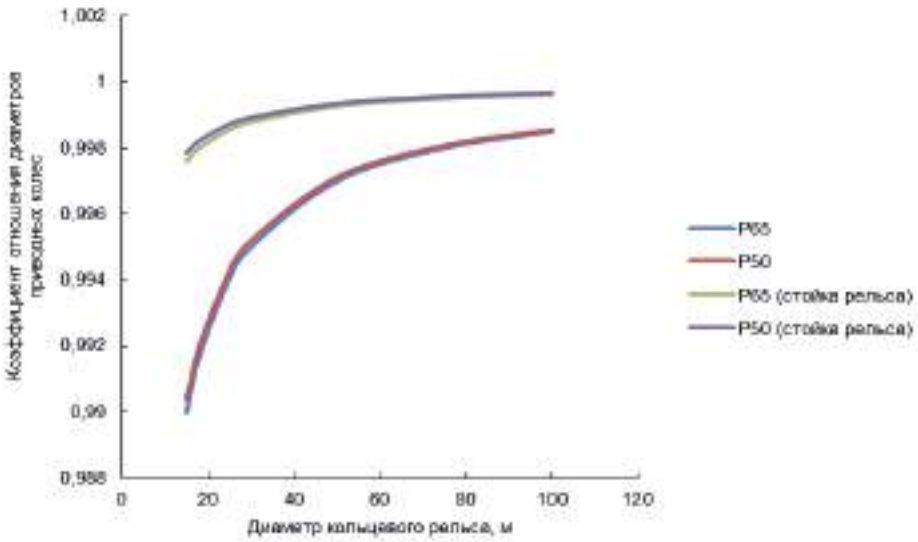



**Рисунок 3. График зависимости коэффициента отношения диаметров приводных колес от диаметра кольцевого рельса.**
**Figure 3. Dependence diagram of the ratio of diameters of driving wheels on the diameter of the ring-type rail.**

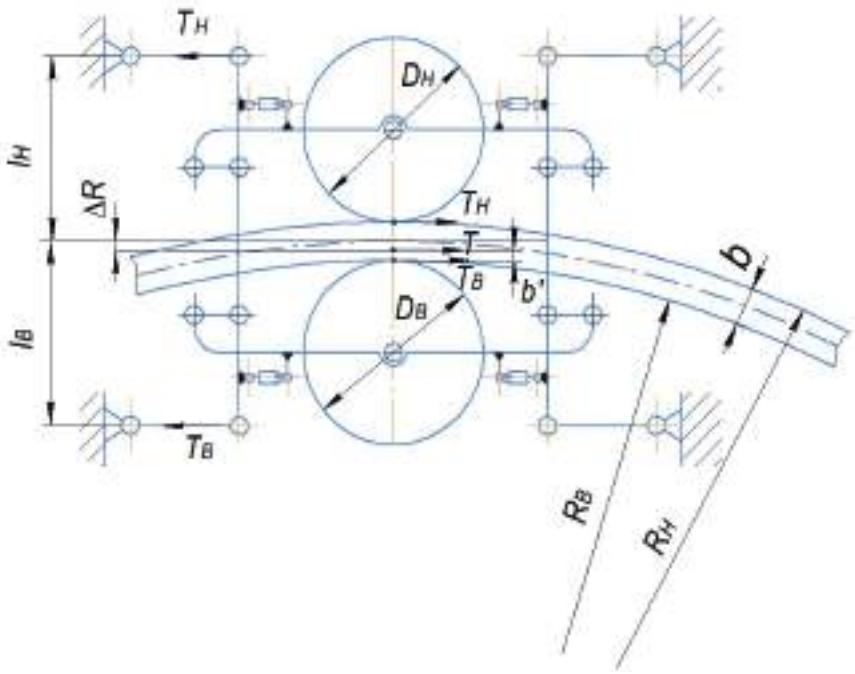



**Рисунок 4. Схема сил, действующих на тяговое устройство.** *T* – суммарная сила тяги; $T_н$, $T_в$ – тяговые усилия на наружной и внутренней частях тягового устройства.

**Figure 4. Scheme of forces acting to the traction device.** T – total traction force; Tn, Tв – tractive effort at the outer and inner parts of the traction device.

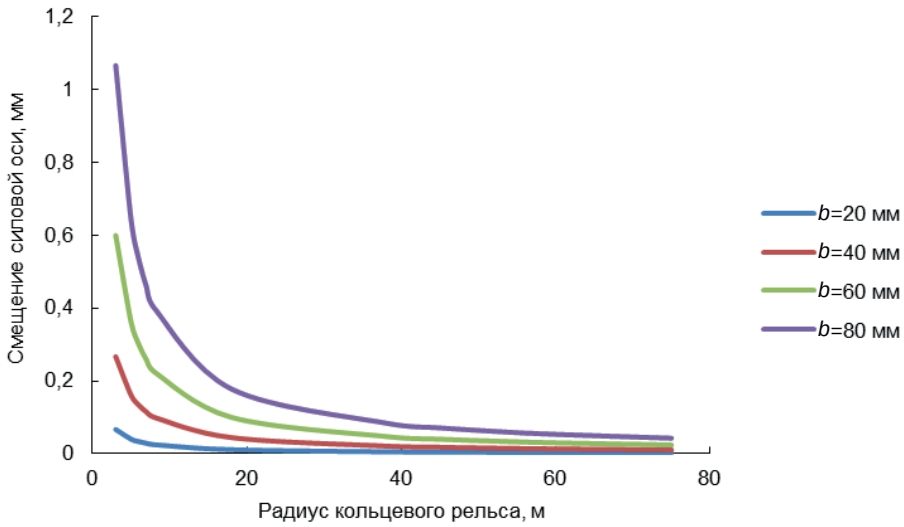



**Рисунок 5. График зависимости смещения силовой оси тягового устройства от диаметра кольцевого рельса.**
**Figure 5. Dependence diagram of displacement of the force axis of the traction device from the diameter of the ring-type rail.**

Во избежание перекоса тягового устройства равнодействующая сил $T_н$ и $T_в$ должна совпадать по направлению с равнодействующей реакции рамы вращаемой части агрегата (гребной фермы). Кроме этого, для устранения перекоса тягового устройства необходимо уравновесить внутреннюю и наружную части устройства, т. е. создать условие, при котором $T_н = T_в$, и, как следствие, ввести поправку в плечи $l_н$, $l_в$ сил $T_н$ и $T_в$, возникающих в тягах от действия внешнего сопротивления, для чего необходимо выполнение условия:

$$\frac{l_н}{l_в} = \frac{T_в}{T_н} = \frac{1}{K}.$$

Из зависимости (2) следует, что смещение силовой оси тягового устройства относительно оси головки кольцевого рельса следует учитывать при малых радиусах рельса и большой ширине его головки.

На рис. 5 представлены графики зависимости смещения силовой оси тягового устройства $\Delta R$ для диаметров кольцевого рельса от 6до 150 м и ширине головки рельса от 20 до 80 мм.

Анализ результатов показывает, что смещение силовой оси тягового устройства относительно оси рельса резко возрастает для малых значений диаметра кольцевого рельса от 6 до 18м. При увеличении диаметра кольцевого рельса

от 18 до 100 м наблюдается резкое снижение смещения силовой оси. Максимальное значение смещения силовой оси получено для диаметра кольцевого рельса 6 м и ширине головки рельса 80 мм.

## Заключение

Теоретическими исследованиями установлено, что при проектировании фрикционного привода горно-обогатительных агрегатов на основе тягового устройства рычажного типа для устранения продольного скольжения колес и возможных перекосов механизма необходимо в расчет геометрических параметров устройства вносить соответствующие поправки. Высокая эффективность привода достигается благодаря автоматическому регулированию давления приводных колес на кольцевой рельс в зависимости от сопротивления вращаемой части агрегата, в частности гребковой фермы сгустителя.

Отмеченные преимущества рассматриваемого фрикционного привода позволяют использовать его в качестве привода вращающихся частей крупных агрегатов, таких как цементные печи, мельницы, барабанные сушилки и смесители, при этом кольцевой рельс, заменяющий зубчатый венец большого диаметра, устанавливают на вращающейся части агрегата (корпусе, барабане), а привод с тяговым устройством – на раме машины.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Авдохин В. М. Основы обогащения полезных ископаемых. М: Горная книга, 2014. 417 с.
2. Кибирев В. И., Бауман А. В., Никитин А. Е. О создании современных российских сгустителей // Горная промышленность. 2017. № 5. С. 32–34.
3. Бауман А. В. О модернизации отечественных радиальных сгустителей // Обогащение руд. 2013. № 1. С. 44–49.
4. Bauman A. V. Reconstruction and modernization of radial thickeners // VIII Congress of dressers of CIS countries: collection of materials. Moscow: MISIS, 2011. Vol. 1. P. 35–38.
5. Шевцов М. Н., Видищева Г. Г., Леошко Н. О. Устройство сгустителя и принцип его работы // Новые идеи нового века: материалы междунар. науч. конф. Хабаровск: ТОГУ, 2017. № 3. С. 400–403.
6. Tan C. K., Setiawan R., Bao J., Bickert G. Studies on parameter estimation and Model Predictive Control of Paste Thickeners // Journal of Process Control. 2015. Vol. 28. P. 1–8. 10.
7. Бауман А. В. Критерии выбора радиального сгустителя для процессов сгущения и водооборота // Обогащение руд. 2013. № 4. С. 40–43.
8. Akhmadiev F. G., Zinnatullin N. N. Mathematical Modeling of the Separation of Two-Phase Mixtures in a Centrifugal Thickener // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2014. Vol. 48, issue 2. P. 199–205. https://doi.org/10.1134/S004057951402002X
9. Parsapour G. A., Hossininasab M., Yahyaei M., Banisi S. Effect of Settling Test Procedure on Sizing Thickeners // Separation and Purification Technology. 2014. Vol. 122. P. 87–95. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2013.11.001
10. Доманский И. В., Давыдов И. В., Малофеев М. Н. Исследование затрат мощности на перемешивание и транспорт к разгрузочным устройствам сгущенной пульпы в радиальных сгустителях непрерывного и полунепрерывного действия // Цветные металлы и минералы: тез. докл. Восьмого междунар. конгресса. Красноярск, 2016. С. 24–25.
11. Авдеев А. М., Большунов А. В., Соколова Г. В. Рельсовые транспортные средства для сложных горно-геологических условий // Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов: сб. науч. статей Междунар. науч.-практ. конф. Новокузнецк, 2013. 295 с.
12. Берсенев В. С. Тяговые устройства с автоматическим регулированием давления приводных колес на рельс // Записки ЛГИ. 1970. Т. LX. Вып. 1. С. 3–20.
13. Timofeev I. P., Bolshunov A. V., Stoliarova M. S. Specific Features of Friction-Type Traction Gear of Rotating Machines Drives // Procedia Engineering. 2017. Vol. 206. P. 1654–1660. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.693
14. Большунов А. В., Соколова Г. В., Авдеев А. М. Перспективы использования тяговых устройств фрикционного типа в приводах горных, транспортных и технологических машин // Записки Горного института. 2014. Т. 209. С. 9–12.
15. Timofeev I. P., Bolshunov A. V., Avdeev A. M. Justification of Lever Arrangement Parameters for Friction-Type Traction Gear // Procedia Engineering. 2016. Vol. 150. P. 1329–1334. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.313

*Статья поступила в редакцию 8 января 2019 г.*

УДК 625.32 https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-1-136-142

# Substantiation of parameters of friction drive units for the ore mining and dressing plant

**Igor' Parfenovich TIMOFEEV***,
**Marina Sergeevna STOLYAROVA****

Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

***Relevance*** of the work is due to the possibility of creating a friction drive of rotating parts of units for ore mining and dressing plant. These are pulp thickeners based on a traction device with adjustable pressure of driving wheels against a rail ensuring linear dependence of the developed propulsive effort on external resistance. This eliminates the need for additional dead-weight, reduces specific quantity of metal and energy intensity of a drive.
***Purpose of the work.*** Substantiation of parameters of the friction drive based on a lever-type draw gear with adjustable resistance as function of pressure from the driving wheels that ensures reliable wheel-rail adhesion in a mode of elastic sliding; this eliminates tilt of the device on a ring-type rail, longitudinal slide and undercarriage wear.
***Research methodology.*** A systematic approach has been used, which includes analytical and computational methods using mathematical modeling, structural and kinetostatic analysis, as well as some conventional concepts of classical mechanics and mechanism and machine theory.
***Results and their application.*** The main dependences of parameters of the traction device are determined taking into account peculiarities of work on the ring-type rail and ensuring reliable wheel-rail adhesion in a mode of elastic sliding. The friction drive based on the traction device that is capable of developing a propulsive effort independent of adhesion weight of the traction unit can be used as a drive for pulp thickeners with a peripheral drive and as a drive for rotating parts of large units such as cement kilns, mills, cylinder dryers and mixers.
***Conclusions.*** The features of the operation of the friction drive for the ore mining and dressing plant using the ring-type rail are considered; methods for eliminating possible tilts of the device causing undercarriage wear are given; correcting factors for the ratio of driving wheel diameters and geometric parameters of the mechanism depending on the radii of the rail working surfaces are proposed.

*Keywords*: beneficiation, thickener, friction drive, ring-type rail, traction device, lever mechanism.

## REFERENCES

1. Avdokhin V. M. 2014, *Osnovy obogashcheniya poleznykh iskopayemykh* [Fundamentals of mineral processing]. Moscow, 417 p.
2. Kibirev V. I., Bauman A. V., Nikitin A. E. 2017, About creation of modern Russian thickeners. *Gornaya promyshlennost'* [Mining industry], no. 5, pp. 32–34. (*In Russ.*)
3. Bauman A. V. 2013, About modernization of domestic radial thickeners. *Obogashcheniye rud* [Obogashchenie Rud], no. 1, pp. 44–49. (*In Russ.*)
4. Bauman A. V. 2011, Reconstruction and modernization of radial thickeners. VIII Congress of dressers of CIS countries: collection of materials. Moscow: MISIS, vol. 1, pp. 35–38.
5. Shevtsov M. N., Vidishcheva G. G., Leoshko N. O. 2017, *Ustroystvo sgustitelya i printsip yego raboty* [Configuration of thickener and its operating principle]. New ideas of the new century: proceedings of the international scientific conference, Khabarovsk, no. 3, pp. 400–403.
6. Tan C. K., Setiawan R., Bao J., Bickert G. 2015, Studies on parameter estimation and Model Predictive Control of Paste Thickeners. *Journal of Process Control*, vol. 28, pp. 1–8.
7. Bauman A. V. 2013, Selection criteria of a radial thickener for processes of thickening and water circulation. *Obogashcheniye rud* [Ore beneficiation], no. 4, pp. 40–43. (*In Russ.)*
8. Akhmadiev F. G., Zinnatullin N. N. 2014, Mathematical Modeling of the Separation of Two-Phase Mixtures in a Centrifugal Thickener. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, vol. 48, issue 2, pp. 199–205. https://doi.org/10.1134/S004057951402002X
9. Parsapour G. A., Hossininasab M., Yahyaei M., Banisi S. 2014, Effect of Settling Test Procedure on Sizing Thickeners. *Separation and Purification Technology*, vol. 122, pp. 87–95. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2013.11.001
10. Domansky I. V., Davydov I. V., Malofeev M.N. 2016, *Issledovaniye zatrat moshchnosti na peremeshivaniye i transport k razgruzochnym ustroystvam sgushchennoy pul'py v radial'nykh sgustitelyakh nepreryvnogo i polunepreryvnogo deystviya* [Study of power consumption for mixing and transport for discharging gears of thickened pulp in radial thickeners of continuous and semi-continuous action]. Non-ferrous metals and minerals: scientific conference abstracts of eighth international congress. Krasnoyarsk, pp. 24–25.
11. Avdeev A. M., Bolshunov A. V., Sokolova G. V. 2013, *Rel'sovyye transportnyye sredstva dlya slozhnykh gorno-geologicheskikh usloviy* [Rail vehicles for complex mining and geological conditions]. High-tech technologies for the development and use of mineral resources: collection of papers of International scientific and practical conference. Novokuznetsk, 295 p.
12. Bersenev V. C. 1970, Traction devices with automatic control of pressure of the driving wheels on the rail. *Zapiski Leningradskogo gornogo instituta* [Proceedings of Leningrad mining institute], vol. LX. Issue 1, pp. 3–20. (*In Russ.*)
13. Timofeev I. P., Bolshunov A. V., Stoliarova M. S. 2017, Specific Features of Friction-Type Traction Gear of Rotating Machines Drives. *Procedia Engineering*, vol. 206, pp. 1654–1660. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.693
14. Bolshunov A. V., Sokolova G. V., Avdeev A. M.2014, Prospects for the use of friction-type traction gears in drives of mining, transport and technological machines. *Zapiski Leningradskogo gornogo instituta* [Proceedings of Leningrad mining institute], vol. 209, pp. 9–12. (*In Russ.)*
15. Timofeev I. P., Bolshunov A. V., Avdeev A. M. 2016, Justification of Lever Arrangement Parameters for Friction-Type Traction Gear. *Procedia Engineering*, vol. 150, pp. 1329–1334. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.313

*The article was received on January 8, 2019*

* ✉ partim@mail.ru
https://orcid.org/0000-0001-9572-0542
**89623463043@mail.ru
https://orcid.org/0000-0003-2539-6032

# Экономические науки
# Economic sciences

УДК 338.2:351.82:330.15 https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-1-143-148

## Environmental impact analysis as a tool for state regulation of economic activity

**Andrey Nikolaevich IVANOV**[*],
**Margarita Nikolaevna IGNAT'EV**[**]
**Nataliya Georgievna PUSTOKHINA**[***],

Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia

***Relevance***. The transition to a model of sustainable development requires an increase in the effectiveness of state regulation of environmental management, which in turn implies the use of effective regulatory tools, including a set of administrative and economic tools. Under the conditions of an oncoming environmental crisis and degradation, environmental impact analysis (EIA) becomes increasingly important, the purpose of which is to make environmentally sound decisions by evaluating the forecasted impacts and justifying measures to reduce or prevent them.
***Purpose of the study.*** Analysis and systematization of institutional support for EIA, identification of evolutionary changes in relation to environmental assessment, its importance, the order of implementation, the existing shortcomings.
***Results.*** While the study, the stages of institutional support for EIA in Russia were identified and the expediency of distinguishing four stages was justified. At the first stage, it is, actually, not about the assessment, but about the intentions of its setting. At the second stage, separate principles of environmental regulation are implemented when planning business activities. Ecological appraisal (EA) becomes compulsory. The second stage is considered as preparatory one for development and approval of laws regarding EIA. At the third stage, the legislative recognition of EIA is carried out (1994, 2000); the Federal Law "On Ecological appraisal" is adopted. A new edition of the Federal Law "On Environmental Protection" now has the Article 32 called "Conducting the environmental impact analysis". The fourth stage (now in force) is a change in attitude towards the objects of ecological appraisal which takes place due to amendments in the Urban Planning Code of the Russian Federation. The implementation of provisions is differentiated with the project. At the same time, the list of facilities requiring EA is significantly reduced, which is absolutely illogical in the current situation of an impending ecological crisis.
***Conclusions***. The staging of evolutionary changes in the institutional support for EIA makes it possible to solve the problem of its improvement most reasonably in the presence of "bottlenecks" identified in the research process.

*Keywords*: State regulation, tools, EIA, changes, stages, improvement.

### Introduction

State regulation of economy, according to the author [1], is "the system of measures and activities of the state for sustainable functioning and development of the country's economy in compliance of the socio-economic and other goals approved by society". In contrast to management, it slightly affects a regulated object in order to maintain the direction of development and suppress negative situations that hinder the normal course of processes. The state regulation of environmental management fits into the framework of state regulation of economy having ecological-economic systems as regulated objects with a multi-target development of economic and environmental subsystems [2, 3]. Hence, the decisions that are made under the influence of regulations introduced by the state require consideration of the laws governing the development of the biosphere.

The tasks solved in the process of environmental management include:

– implementation of measures for rehabilitation of natural resources and environmental protection;
– formation of legal support for environmental management [4];
– stabilization of ecological situation and preventing its deterioration, etc. [5, 6].

Regulatory instruments play an important role in solving the tasks set for the state regulation of environmental management; they include administrative and economic instruments [7]. The choice of certain instruments based on the most appropriate correlation of administrative and economic ones remains debated, although the effectiveness of government regulation largely depends on them. Nowadays, administrative instruments are of high-priority, including EIA — environmental impact analysis. EIA is defined as "a process that facilitates the adoption of an environmentally oriented management decision on the implementation of the designed economic and other activities by identifying possible adverse impacts, assessing environmental impacts, taking public opinion into consideration, developing measures to reduce and prevent impacts" (*Regulations about the evaluation of the impact of the designed economic and other activities on the environment in the Russian Federation: they are approved by order of the State Committee for Environmental Protection of Russia dated 05.16.2000, No. 372.*). The effectiveness of EIA is largely determined by the presence of appropriate legal support, its completeness and timeliness of improvement [8].

### Results

The emergence of EIA in Russia is associated with 1985 when the country began to revise some regulatory and technical documentation while connecting the design with requirements of environmental protection. Particularly, in the designed system, the interaction between systems was considered in addition to the links of nature and technology (as well as the impact of the pro-

[*] graykardinal@yandex.ru
[**] ✉ rinis@mail.ru
https://orcid.org/0000-0001-9014-905X
[***] kao@m.ursmu.ru

jected system on people) [9]. A decree of the Supreme Soviet of the USSR "On compliance with the requirements of legislation for nature preservation and rational use of resources" has appeared. The State Committee for Construction of the USSR has adopted construction standards and regulations SNiP 1.02.01–85 called "Regulations on the composition, procedure for the development, coordination and approval of design specifications and estimates for construction of enterprises, buildings and facilities"[1]. According to them, the designers were required to assess the environmental situation within the territory of the proposed location of an object and forecast the impact of construction on the environment. However, as far back as 1980, based on materials from several research institutes of the Ukrainian Soviet Socialist Republic, a methodology was developed for the environmental and economic assessment of projects; it was included in the list of legislative, instructive and regulatory documents on environmental protection and rational use of natural resources [10]. The methodology involved a four-stage assessment work: evaluation of environmentally acceptable construction of new enterprises and facilities and reconstruction of existing ones, economic justification of projects, minimization of impact of the designed object on the environment, determination of the comparative environmental and economic effect of capital investments on the construction of new production facilities and reconstruction of existing ones. It acted though as temporarily agreed with the State Planning Committee of the Republic within the territory of Ukraine until 1982 only and was canceled due to cumbersomeness of the necessary calculations. This method can be considered as an attempt of preventive management of environmental effects, which, after appropriate revision, could be recommended for practical use [11].

In December, 1987, the State expert appraisal board of drafts and estimates of the State Committee for Construction of the USSR prepared and approved "Handbook on drawing up a section (working draft). Environmental Protection" for SNiP 1.02.01–85, which specified and developed some basic provisions and requirements for protection of environment components and contained the necessary reference material[2]. The following questions were subject to detailed consideration: protection of the atmosphere from pollution, protection of water resources from pollution and depletion and recultivation of disturbed lands. The manual confirmed the requirement to assess the initial state of the environment prior to construction of the designed object, to identify production factors that have a negative impact on the environment, to develop measures aimed at reducing the anthropogenic impact, and to predict possible changes in adjacent areas. However, there was no any authoritative document regulating the procedure for environmental impact analysis. The temporary regulations about conducting EIA when the development of technical and economic feasibility (calculations) and projects for construction of national economic facilities and complexes first appeared in May 1990[3]. Due to its temporary nature, its validity period was limited to 01.01.1992. In 1988, the State ecological appraisal began to function in the country, which corresponds with the formation of the National Committee of the USSR on nature conservation, a number of similar territorial divisions, as well as issuing the Decree of the Central Committee of the Communist Party of the USSR and the Council of Ministers (January, 1988) called "On the major reconstruction in the sphere of nature conservation in the country", which entrusted the State Committee for Nature Protection on conducting state ecological appraisal. For this purpose, a new subdivision was created (State Environmental Expert Administration). The Section 5 called "State environmental appraisal" was singled out in the Federal Law "On Environmental Protection" (1991), which implied the evaluation of consequences, but this type of activity was not disclosed in the Federal Law. The EIA procedure continued to be regulated by the State Environmental Committee based on the subordinate law.

Later (upon termination of temporary regulations), Y. L. Maksimenko, I. D. Gorkina have prepared the Manual on environmental impact analysis (EIA) when development of technical and economic feasibility of investments and projects in construction of national economic facilities and complexes [12]. Unlike Regulations, the manual gives the detailed description of each of the five stages of EIA: development of the concept of the planned activity; determination of environmental impacts; environmental impact identification; project adjustment; preparation of a statement about environmental consequences.

That same year, "Temporary rules for the environmental justification of economic activities in project documentation" were introduced. They were approved by the State Environmental Expert Administration[4] and characterized the content of information provided for environmental appraisal. These temporary rules just mentioned EIA. The resolution on the State environmental appraisal adopted by the Council of Ministers in September 1993, did not have even a mention about EIA. According to the authors, some assumptions for the regulatory activity of EIA are as follows:

– increasing the anthropogenic environmental impact due to the growing demand for natural resources;

– awareness of hazard consequences that are formed under the influence of the changed natural environment among recipients who perceive the effects, primarily among the population;

– presence of the tried and tested way for appraisal of construction projects, preventing the implementation of design solutions without a positive expert opinion;

– involvement of environmentalists in the panel of experts for preparation of decisions concerning large projects;

– legislative regulation of the environmental appraisal, creation of a special subdivision within the Government office for nature preservation (State Environmental Expert Administration) for conducting the appraisal;

– domestic experience in carrying out EIA due to performance of such studies (fragmentarily) by teams of research organizations based on contracts entered with customers.

The draft for "Regulation on the environmental impact analysis in the Russian Federation" was developed in the spring of 1994; then it was approved in a revised form by the Order of the Ministry of Natural Resources of the Russian Federation in June

[1]SNiP 1.02.01–85. Regulations on the composition, procedure for the development, coordination and approval of design specifications and estimates for construction of enterprises, buildings and facilities. URL: http://docs.cntd.ru/document/1200032620

[2]Handbook for preparation of the section of the project called "Environmental protection." Moscow, 1987. 186 p.

[3]Temporary regulations on the way of conducting the environmental impact analysis when the development of technical and economic feasibility (calculations) of investments in construction of national economic facilities and complexes: approved by first deputy Chairman of the USSR State Committee dated 05.18.1990. Moscow, 6 p.

[4]Temporary regulations on the environmental justification of economic activities in pre-project and design documents dated 08.1.1992. URL: http://gost.donses.ru/Index1/2/2822.htm

of the same year[5]. The Regulation contained the scope of EIA, requirements for the content of EIA activity; it disclosed the obligations of the participants relatively EIA, the procedure for holding public hearings and liability for offenses. The Regulation was accompanied by a list of types and objects of economic and other activities. While preparation of justifying documentation for the construction EIA is carried out on a mandatory basis. The procedure for making an EIA decision for objects excluded from that list is not clearly defined. In contrast to the Temporary Regulations (1990), the information from the Regulation is more concise regarding the content of EIA. It is worth noting the lack of the EIA methodology as a drawback. At the same time, the Regulation specifies the applicable scope of EIA and the nature of public hearings. Initially, EIA is defined as a process of forecasting impacts and consequences of a project or an operating facility [13], or as a process of consideration the environmental requirements of the Russian Federation when preparing and making decisions about the socio-economic development of society.

The year 1995 turns out to be fruitful for legislative instruments and subordinate laws in the sphere of State ecological appraisal. In November 1995, the Federal Law "On ecological appraisal" came into effect, which (with several amendments from 1998, 2004, 2005, 2006. etc.) is still in force being the main legislative act in terms of ecological appraisal. Article 14 of the Federal Law, when determining the procedure for conducting the State ecological appraisal, indicates that the documentation to be examined should include materials for the environmental impact analysis of economic and other activities, but the Federal Law does not contain any requirements for preparation of these materials or the procedure for this analysis. Further, a few subordinate laws were adopted:

– Regulation on the State appraisal procedure (1996);

– Regulation on the environmental justification of economic and other activities (1995);

– Rules of the State ecological appraisal (1997);

– The list of regulatory documents for the State ecological appraisal, as well as for preparation of environmental justification of economic and other activities (1997).

While the development of the Regulation "On EIA in the Russian Federation", several methodological provisions (guidelines), manuals, instructions at the sectorial level were developed, each of which covered the specifics of environmental impacts caused by peculiarities of technological processes. Two documents issued by the Ministry of Construction in 1995 are noteworthy: SP-11-101–95 "Procedure for the development, coordination, approval and composition of the rationale for investment in construction of enterprises, buildings and facilities" and SNiP 11-01-95 "Regulation on the procedure for the development, coordination, approval and composition of project documentation for construction of enterprises, buildings and facilities"[6, 7]. The first of them defines the requirements for justification of investments and the need for the section "Environmental impact analysis" together with the pre-project documentation – a feasibility study or a working draft. There are no specific requirements for preparation of the section in the document, since it is assumed that they should be determined by regulatory documents of the State Ecology Committee. SNiP 11-01–95 contains requirements for project documentation, which should include the "Environmental Protection" section. In 1998, the Guide for the development of the "Environmental impact analysis" section was prepared for SP-11-101–95. Then, in 2000, the Handbook for preparation of the section called "Environmental protection" for the Regulation on the procedure of development, coordination, approval and composition of project documentation for construction of enterprises, buildings and facilities, SNiP 11-01–95, appeared.

In 2000, in order to establish uniform rules for the appraisal in the Russian Federation and to determine the main provisions of EIA, the Government office for nature preservation of the Russian Federation approved the Regulation on the Environmental impact analysis of planned economic and other activities in the Russian Federation. The Regulation is more detailed document than the previous one. It covers some fundamental principles of EIA, discloses the content of stages of EIA; a great attention is paid to information and public participation in the EIA process. The final confirmation of the significance of EIA was the introduction of Article 32 into the new Federal Law "On Environmental Protection". Along with the legislative requirement for ecological appraisal (Article 33), the procedure for which was determined by the Federal Law "On ecological appraisal," Chapter VI of the Federal Law "On Environmental Protection" implies the requirement for EIA, materials for which should be established by federal executive authorities in the field of environmental management.

In the Regulation, the definition of EIA is given from the standpoint of a process that facilitates the adoption of an environmentally oriented management decision. The same aspect is expressed in the Federal Law "On Environmental Protection" and subsequent works [14 et al.]. Supporting the authors' point of view regarding the consideration of EIA from the position of the possibility of justifying environmentally oriented solutions, it should be noted that there is no need for economic evaluation of consequences in the EIA description, i.e., ensuring a balance between environmental and economic targets. Hence, the author's definition of EIA is a process that contributes to making environmentally oriented decisions in the design, planning, approval and implementation of economic and other activities by identifying possible adverse environmental impacts, assessing all types of impacts and economic evaluation of the latter, consideration of public opinion and preventing impacts.

In 2006–2008, there were changes in the Town Planning Code of the Russian Federation (GKF of the Russian Federation) and in some legislative acts, including the Federal Law "On ecological appraisal", the Federal Law "On Environmental Protection". According to a new edition of the Civil Code, the composition of the project documentation was changed: instead of the section "Environmental Protection", the section "List of Environmental Protection Measures" was included, and thus the project was distinguished from substantiation package. All substantiation materials were moved to the pre-project stage, including environmental substantiation. According to the new version of the GKF of the Russian Federation, a project should have only those

[5]Regulation on the environmental impact analysis in the Russian Federation dated July 18, 1994, No. 222. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_4545

[6]SP 11-101–95. The procedure of development, coordination, approval and composition of the rationale for investment in construction of enterprises, buildings and facilities. URL: http://docs.cntd.ru/document/871001184

[7]SNiP 11-01–95. Regulation on the procedure of development, coordination, approval and composition of project documentation for construction of enterprises, buildings and facilities. URL: http://docs.cntd.ru/document/9053289

documents that are necessary for construction and control (allowing to monitor the construction progress), as well as for the environmentally sound operation of the construction object. In contrast to the legislative requirements that were in force earlier, the provision of pre-project documentation (feasibility study, investment justification, etc.) and EIA based on the results of pre-project development for EA is no longer required. A customer may determine completeness and need of pre-project developments.

The project phase is regulated by law quite clearly. The project phase involves implementation of in-depth studies, including that on environmental issues. If EIA is not completed at the pre-project phase, it continues during planning stage with the help of engineering and environmental surveys, engineering-geological and geotechnical studies. The results of EIA are included in the "List of Environmental Protection Measures" section. If necessary (in accordance with Article 11 of the Federal Law "On ecological appraisal", the materials should be submitted for ecological appraisal), they are sent for ecological appraisal. In all other cases, the EIA materials as part of the project documentation are provided for the government expert review.

The authors, based on systematization and analysis of regulatory documents, as well as experience in the regulation of EIA and EA procedures, have identified the evolution of environmental assessment in Russia and justified the expediency of distinguishing four stages. In such a case, the content of three stages of environmental assessment, was disclosed by Norman Lee in [15].

The first stage (1974–1984) is characterized by the presence of certain aspects of environmental project development and ecological appraisal. During this period, a section on the protection of nature and the rational use of natural resources appears in the composition of annual national economic plans and programs. Territorial Complex Scheme of Nature Protection has been developed since 1978; the section "Environmental Protection" appears in the project documentation. All these programs, planning documents are subject to the government expert review and construction is not allowed without a positive decision. Sometimes environmentalists are invited to the expert group to conduct EA in the case of implementation of large projects by them. In fact, this is not about evaluation, but about intentions for its implementation.

A distinctive feature of the second stage (1985–1994) is the introduction of some principles of environmental regulation in the planning of economic activities in accordance with SNiP 1-02–85 and the development of first guidance and advisory materials on EIA, as well as the adoption of government decrees and decrees on the need for energy efficiency and the creation of the State Environmental Expert Administration. The Federal Law "On Environmental Protection" confirmed EA as a mandatory activity. The second stage can be considered as preparatory for the development and approval of relevant laws, which cover changes in the composition of project documentation, the procedure for carrying out EIA and EA that leads to a weakening of environmental factor in the project development.

The third stage (1994–2003) is distinguished by legislative recognition of EIA and EA. In 1994, the regulation on EIA in the Russian Federation was approved; in 2000 – it was amended and considered the fundamental recommendations of SP 11-101–95. In 1995, the Federal Law "On ecological appraisal" and some subordinate laws were adopted, including the Regulation on the environmental justification of economic and other activities (1995). The new edition of the Federal Law "On Environmental Protection" (2002), along with the mandatory nature of energy efficiency, pays attention to EIA (a specific article 32 "Conducting the environmental impact analysis" appeared in Chapter VI of the Federal Law).

The fourth stage covers the period from 2004 to the present and is characterized by a change in attitude towards the composition of project documentation for the objects of ecological appraisal. Amendments were introduced to the Town Planning Code of the Russian Federation and, accordingly, to several legislative acts. The implementation of provisions was differentiated with the project. For pre-project materials, including EIA, a decision about a positive ecological appraisal is not required to obtain. The list of project materials sent for EA is significantly shortened compared to the previous one; it indicates an inexplicable change in attitude towards EA, which is illogical in the context of an impending ecological crisis and recognition of the need to move to a new development model. This situation remains debated. A customer reserves the right to determine the completeness of pre-project studies. The project documentation focuses on the development of measures to protect the environment.

Currently, there are a lot of recommendations and manuals on EIA for various types of activities. At the same time there are no new regulations governing the composition, content and scope of pre-project developments (SP 11-101–95 and SNiP 11-01–95 are still in use). The Federal Law on EIA is still not prepared; the regulation of ecological appraisal has just legislatively executed.

## Conclusions

The analysis of legal support of regulation presented by the environmental impact analysis, made it possible to systematize the analyzed information and to identify four stages in the evolution of environmental assessment in Russia. Changes in attitudes towards EIA and ecological appraisal are established, the completeness of legal documents that ensure the effectiveness of EIA are identified, the existing shortcomings are revealed. It is necessary to expand the list of project materials sent for EA, which was unfairly shortened, as well as the adoption of the Federal Law "On environmental impact analysis" (that is, legalization of the EIA regulation). In confirmation of the significance of EIA, we should mention that in the USA, EIA is carried out by federal departments (not customers), and the relevant department has responsibility for EIA and incurs financial expenses by means of taxes [16].

## REFERENCES

1. Kushlin V. I. 2016, *Gosudarstvennoye regulirovaniye ekonomiki* [State regulation of economy]. Moscow, 495 p.
2. Wang R., Wijen F., Pursey P. M. A. R. Heugens. 2018, Government's green grip: Multifaceted state influence on corporate environmental actions in China. *Strategic Management Journal*, vol. 39, issue 2, pp. 403–428.
3. Zhang T., Yao H. 2018, The improvement on the implementation level of environmental policies is demanded in China. *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 25, issue 36, pp. 36035–36038.
4. Popescu G. C., Popescu M. 2018, Consideration regarding policy and environmental legislation concerning biodiversity and protected areas in Romania. 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2018 (Albena, Bulgaria, 2–8 July 2018), vol. 18, issue 5.4, pp. 379–386.
5. Liu S., He P., Dang J. 2018, Evaluation of industry eco-industrialization: case study of Shaanxi, China. *Computer Systems Science and Engineering*, vol. 33, issue 5, pp. 389–395.
6. Khaustov A. P., Redina M. D. 2005, *Upravleniye prirodopol'zovaniyem* [Environmental Management]. Moscow, 334 p.

7. Dociu M., Dunărintu A. 2013, Ecomanagement – an integrated approach of sustainable development. *Quality – Access to Success*, vol. 14, issue SUPPL, pp. 574–577.
8. Cherp O. M., Khotuleva, M. V., Vinnichenko V. N., Daiman S. Yu. 1998, Environmental impact analysis and ecological appraisal. In: Modern mechanisms of environmental regulation. Moscow, Ecoline, pp. 3–86.
9. Preobrazhensky V. S. 1978, *Priroda, tekhnika, geotekhnicheskiye sistemy* [Nature, technology, geotechnical systems]. Moscow, 132 p.
10. Sakhaev V. G. Shcherbitsky B. V. 1986, *Spravochnik po okhrane okruzhayushchey sredy* [Handbook of environmental protection], 149 p.
11. Kamenskaya Yu. Yu, Khovavko I. Yu. 1990, *Ekologo-ekonomicheskaya otsenka proyektov khozyaystvennogo razvitiya* [Ecological and economic evaluation of economic development projects]. Efficiency of environmental protection measures. Ed. by T. S. Khachaturova, K. V. Papenova. Moscow, pp. 93–104.
12. 1992, *Posobiye po otsenke vozdeystviya na okruzhayushchuyu sredu (OVOS) pri razrabotke tekhniko-ekonomicheskikh obosnovaniy (raschetov) investitsiy i proyektov stroitel'stva narodnokhozyaystvennykh ob"yektov i kompleksov* [Manual on environmental impact analysis (EIA) in the development of feasibility studies (calculations) of investments and projects for construction of national economic facilities and complexes]. Ed. by Yu. P. Maksimenko, I. D. Gorkina. Moscow, 80 p.
13. Besyatsky A. V. 1992, *Organizatsionno-pravovyye problemy otsenki vozdeystviya na okruzhayushchuyu sredu* [Organizational and legal problems of environmental impact analysis]: PhD thesis. Moscow, 16 p.
14. Vasilenko T. A., Sverguzova S. V. 2018, Otsenka vozdeystviya na okruzhayushchuyu sredu i ekologicheskaya ekspertiza inzhenernykh proyektov [Environmental impact analysis and ecological appraisal of engineering projects], Moscow, 264 p.
15. Li N. 1995, Ecological appraisal, under the editorship of S. M. Govorushko. Moscow, 184 p.
16. Logvinov A. A. 2006, Methodological bases for the assessment of regional socio-natural systems. *Problemy regional'noy ekologii* [Regional Environmental Issues], no. 6, pp. 6–11. (*In Russ.*)

*The article was received on December 26, 2018*

УДК 338.2:351.82:330.15 https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-1-143-148

# Оценка воздействия на окружающую среду как инструмент государственного регулирования хозяйственной деятельности

**Андрей Николаевич ИВАНОВ***,
**Наталия Георгиевна ПУСТОХИНА****,
**Маргарита Николаевна ИГНАТЬЕВА*****

Уральский государственный горный университет, Россия, Екатеринбург

***Актуальность***. Переход на модель устойчивого развития требует повышения эффективности государственного регулирования природопользования, что в свою очередь предусматривает использование результативного инструментария регулирования, включающего в свой состав набор административных и экономических инструментов. В условиях надвигающегося экологического кризиса и ухудшения экологической ситуации все большую значимость приобретает оценка воздействия на окружающую среду (ОВОС), целью которой является принятие экологически обоснованных решений благодаря выполнению оценки прогнозируемых воздействий и обоснованию мер по их снижению или предупреждению.
***Цель исследования***. Анализ и систематизация институционального обеспечения ОВОС, выявление эволюционных изменений в отношении экологической оценки, ее значимости, порядка проведения, имеющихся недостатков.
***Результаты***. В процессе исследований выявлена этапность институционального обеспечения ОВОС в России и обоснована целесообразность выделения четырех этапов. На первом этапе речь идет фактически не об оценке, а о намерениях ее постановки. На втором этапе реализуются отдельные принципы экологического регулирования при планировании хозяйственной деятельности. Обязательный характер приобретает экологическая экспертиза (ЭЭ). Второй этап рассматривается как подготовительный для разработки и утверждения законов относительно ОВОС. На третьем этапе осуществляется законодательное признание ОВОС (1994, 2000 гг.), принят ФЗ «Об экологической экспертизе». В новой редакции ФЗ «Об охране окружающей среды» появилась статья 32 «Проведение оценки воздействия на окружающую среду». Четвертый этап, продолжающийся и в настоящее время, отличает изменение отношения к объектам экологической экспертизы, имеющее место в силу поправок в Градостроительном кодексе РФ. Выполнение обоснований разграничивается с проектом. При этом перечень объектов, требующих прохождения ЭЭ, существенно уменьшается, что абсолютно нелогично в современной ситуации надвигающегося экологического кризиса.
***Выводы***. Этапность эволюционных изменений институционального обеспечения ОВОС позволяет наиболее обоснованно решать проблему его совершенствования при наличии выявленных в процессе исследования «узких мест».

*Ключевые слова*: государственное регулирование, инструментарий, ОВОС, изменения, этапность, совершенствование.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кушлин В. И. Государственное регулирование экономики. М: Экономика, 2016. 495 с.
2. Wang R., Wijen F., Pursey P. M. A. R. Heugens. Government's green grip: Multifaceted state influence on corporate environmental actions in China // Strategic Management Journal. 2018. Vol. 39, issue 2. P. 403-428.
3. Zhang T., Yao H. The improvement on the implementation level of environmental policies is demanded in China // Environmental Science and Pollution Research. 2018. Vol. 25, issue 36. P. 36035–36038.
4. Popescu G. C., Popescu M. Consideration regarding policy and environmental legislation concerning biodiversity and protected areas in Romania // 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2018 (Albena, Bulgaria, 2–8 July 2018). 2018. Vol. 18, issue 5.4. P. 379–386.
5. Liu S., He P., Dang J. Evaluation of industry eco-industrialization: case study of Shaanxi, China // Computer Systems Science and Engineering. 2018. Vol. 33, issue 5. P. 389–395.
6. Хаустов А. П., Редина М. Д. Управление природопользованием. М.: Высш. школа, 2005. 334 с.
7. Dociu M., Dunărintu A. Ecomanagement – an integrated approach of sustainable development // Quality – Access to Success. 2013. Vol. 14, issue SUPPL. P. 574–577.
8. Черп О. М., Хотулева М. В., Винниченко В. Н., Дайман С. Ю. Оценка экологического воздействия и экологическая экспертиза // Современные механизмы экологического регулирования. М.: Эколайн, 1998. С. 3–86.
9. Природа, техника, геотехнические системы / отв. ред. В. С. Преображенский. М.: Наука, 1978. 132 с.
10. Сахаев В. Г., Щербицкий Б. В. Справочник по охране окружающей среды. Киев: Будивельник, 1986. 149 с.
11. Каменская Ю. Ю., Ховавко И. Ю. Эколого-экономическая оценка проектов хозяйственного развития // Эффективность природоохранных мероприятий / под ред. Т. С. Хачатуровой, К. В. Папенова. М.: Изд-во МГУ, 1990. С. 93–104.
12. Пособие по оценке воздействия на окружающую среду (ОВОС) при разработке технико-экономических обоснований (расчетов) инвестиций и проектов строительства народнохозяйственных объектов и комплексов / под общ. ред. Ю. П. Максименко, И. Д. Горкиной. М., 1992. 80 с.
13. Бесяцкий А. В. Организационно-правовые проблемы оценки воздействия на окружающую среду: автореф. дис. … канд. юрид. наук. М.: 1992. 16 с.
14. Василенко Т. А., Свергызова С. В. Оценка воздействия на окружающую среду и экологическая экспертиза инженерных проектов. М.: ИНФРА-Инженерия, 2018. 264 с.
15. Ли Н. Экологическая экспертиза: пер. с англ. / под ред. С. М. Говорушко. М.: Экопресс, 1995. 184 с.
16. Логвинов А. А. Методологические основания оценки региональных социоприродных систем // Проблемы региональной экологии. 2006. № 6. С. 6–11.

*Статья поступила в редакцию 26 декабря 2018 г.*

* graykardinal@yandex.ru
** kao@m.ursmu.ru
*** ✉ rinis@mail.ru
https://orcid.org/0000-0001-9014-905X

УДК 332.1 https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-1-149-155

# Эколого-экономическое развитие муниципальных образований на сырьевых территориях Забайкальского края в контексте концепции «зеленой» экономики

**Ирина Александровна ЗАБЕЛИНА**[1,*],
**Юлия Владимировна КОЛОТОВКИНА**[2,**]

[1]Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, Россия, Чита
[2]Забайкальский государственный университет, Россия, Чита

***Актуальность исследования*** обусловлена необходимостью перехода к «зеленой» экономике, идея которой широко обсуждается в научной эколого-экономической литературе. В настоящее время уровень негативного воздействия на окружающую среду во многих природно-ресурсных российских регионах заметно превышает среднероссийский. Такая ситуация характерна и для некоторых территорий Востока РФ с исторически сложившейся сырьевой специализацией экономики. Увеличение масштабов добычи и переработки природных ресурсов на обозначенных территориях, в том числе в рамках реализации совместных российско-китайских проектов, может способствовать усилению экологического дискомфорта местного населения.

***Целью исследования*** является оценка социо-эколого-экономического развития муниципальных образований одного из приграничных регионов – Забайкальского края в контексте концепции «зеленой» экономики с использованием двух количественных факторов, характеризующих социальные и экономические аспекты развития: среднегодовой фонд заработной платы в расчете на душу населения (определяет благосостояние домохозяйств); объем отгруженных товаров собственного производства, выполненных работ и услуг собственными силами (определяет результаты хозяйственной деятельности предприятий). Ключевые эколого-экономические показатели, используемые в данной работе, – индикаторы эко-интенсивности для хозяйственных систем муниципальных районов.

***Результаты проведенного исследования*** свидетельствуют о том, что жители многих муниципальных образований Забайкальского края живут в условиях повышенной антропогенной нагрузки. При этом показатели, характеризующие уровень социально-экономичекого развития, в них существенно ниже среднего по региону. Показано, что в некоторых муниципальных районах Забайкальского края отмечается ухудшение ситуации по соотношению рассматриваемых социо-эколого-экономических показателей за рассматриваемый временной интервал (2011–2016 гг.).

*Ключевые слова:* «зеленая» экономика, выбросы загрязняющих веществ от стационарных источников, эко-интенсивность, эколого-экономические зоны, муниципальные районы.

## Введение

В настоящее время мировое сообщество признало необходимость перехода к «зеленой» экономике, идея которой предполагает, с одной стороны, рост благосостояния людей и улучшение качества их жизни, а с другой– снижение рисков для окружающей среды и ее деградации *(Навстречу «зеленой экономике»: пути к устойчивому развитию и искоренению бедности. URL: http://www.sustainabledevelopment.ru/upload/File/Reports/ISD_UNEP_GE_Rus.pdf)*. При разработке мероприятий по переходу к «зеленой» экономике важно принимать во внимание критерии, позволяющие оценивать соответствие намеченному пути развития. Существует довольно большое количество параметров, которые в отличие от традиционных макроэкономических показателей принимают во внимание экологические и социальные аспекты при оценке результатов хозяйственной деятельности [1–7 и др.]. Особое внимание в научной литературе уделяется исследованию аспектов развития горных территорий Востока РФ с исторически сложившейся сырьевой специализацией экономики, в том числе в контексте увеличения масштабов приграничного сотрудничества с КРН [8–10 и др.]. Многие исследователи отмечают односторонний характер развития отношений с сопредельным государством – более значимую выгоду от данного взаимодействия получает китайская сторона, тогда как положительные эффекты от реализации совместных проектов для приграничных территорий РФ не столь очевидны. Заинтересованность Китая в импорте топливно-энергетических, минерально-сырьевых и лесных ресурсов для производства собственной продукции является положительным стимулом для развития сырьевого сектора экономики, характеризующегося невысокой степенью переработки природного сырья. Это способствует закреплению сырьевой направленности хозяйственной деятельности на обозначенных территориях. В работе [11] отмечается, что в последние годы произошел заметный рост доли вида деятельности «Добыча полезных ископаемых» в структуре промышленности Дальневосточного федерального округа и отдельных регионов, входящих в его состав. Кроме того, высокая экологическая нагрузка на территориях-экспортерах природных ресурсов негативно сказывается на качестве жизни, выступая причиной повышенной миграционной мобильности местного населения. Таким образом, оценка развития таких территорий с позиции качества экономического роста представляется особенно актуальной.

В данной работе представлены результаты сравнительного анализа эколого-экономического развития муниципальных образований одного из приграничных регионов – Забайкальского края в контексте концепции «зеленой» экономики. Мы использовали два количественных фактора, характеризующих социальные и экономические аспекты развития: среднегодовой фонд заработной платы в расчете на душу населения (определяет благосостояние домохозяйств); объем отгруженных товаров собственного производства, выполненных работ и услуг собственными силами (определяет результаты хозяйственной деятельности предприятий).

## Методы исследования и источники информации

Один из современных подходов к оценке направленности и «цвета» экономического роста предложен в работе П. Виктора [12]. Данная модель была модифицирована и адаптирована для пространственного анализа эффективно-

* i_zabelina@mail.ru
https://orcid.org/0000-0003-4464-2593
**kolotovkina.yulya@mail.ru

сти функционирования региональных экономических систем [13], а также лесной отрасли [14] с позиции концепции «зеленого» роста. В данном исследовании этот инструментарий был использован для оценки эколого-экономического развития муниципальных образований Забайкальского края.

Важными характеристиками качества экономического роста в данной модели выступают индикаторы эко-интенсивности [6, 15]:

– объем выбросов загрязняющих веществ от стационарных источников в расчете на 1000 руб. фонда заработной платы (кг/1000 руб.);

– объем выбросов загрязняющих веществ от стационарных источников в расчете на 1000 руб. объема отгруженных товаров собственного производства, выполненных работ и услуг собственными силами (кг/1000 руб).

Введем также показатель, характеризующий уровень негативного воздействия на окружающую среду в муниципальных образованиях: объем выбросов загрязняющих веществ от стационарных источников в расчете на душу населения. Общая схема модели представлена на рис. 1. На двумерном графике по горизонтальной оси откладывается один из показателей эко-интенсивности. На вертикальной оси – один из показателей, характеризующих социально-экономическое развитие в расчете на душу населения: среднегодовой фонд заработной платы или объем отгруженных товаров собственного производства, выполненных работ и услуг собственными силами в расчете на душу населения.

Точкой $I_0$ обозначено соотношение между эко-интенсивностью и количественным фактором, характеризующим социально-экономическое развитие, среднее для Забайкальского края для конкретного года. Кривая Г представляет собой геометрическое место точек, характеризующихся одинаковым негативным воздействием на окружающую среду в расчете на душу населения – таким же, как в точке $I_0$.

Соотношение между эко-интенсивностью и социально-экономическим показателем для конкретного муниципального образования определяется некоторой точкой на графике. Если для какого-то муниципального образования соответствующая ему точка расположена ниже кривой Г, то на данной территории подушевая экологическая нагрузка меньше, чем в среднем по региону. Соответственно в точках, лежащих выше кривой Г, экологическая нагрузка больше. Таким образом, по соотношению между экологическими и социально-экономическими показателями выделяется шесть зон, каждая из которыхможет быть охарактеризована в терминах «зеленой» экономики:

1) «Зеленая» зона (Gr+) – муниципальные образования, попавшие в эту зону, характеризуются более высокими, чем средние по региону, показателями социально-экономического развития при более низких показателях как эко-интенсивности, так и антропогенной нагрузки;

2) «Коричневая» зона (Br+) – для муниципальных образований, попавших в эту зону, эко-интенсивность ниже средней по региону при более высоких показателях социально-экономического развития, однако негативное воздействие выше;

3) «Черная» зона (Bl+) – для муниципальных районов, попавших в эту зону, эко-интенсивность выше средней по региону при более высоких показателях социально-экономического развития, негативное воздействие также выше;

4) «Черная» зона (Bl-) – для муниципальных образований, попавших в эту зону, оба экологических показателя – эко-интенсивность, негативное воздействие – выше, т. е. хуже, при этом социально-экономический показатель ниже;

5) «Зеленая» зона (Gr–) – муниципальные образования, попавшие в эту зону, характеризуются более низкими, чем средние по региону, социально-экономическим и экологическими показателями, но более высокой эко-интенсивностью;

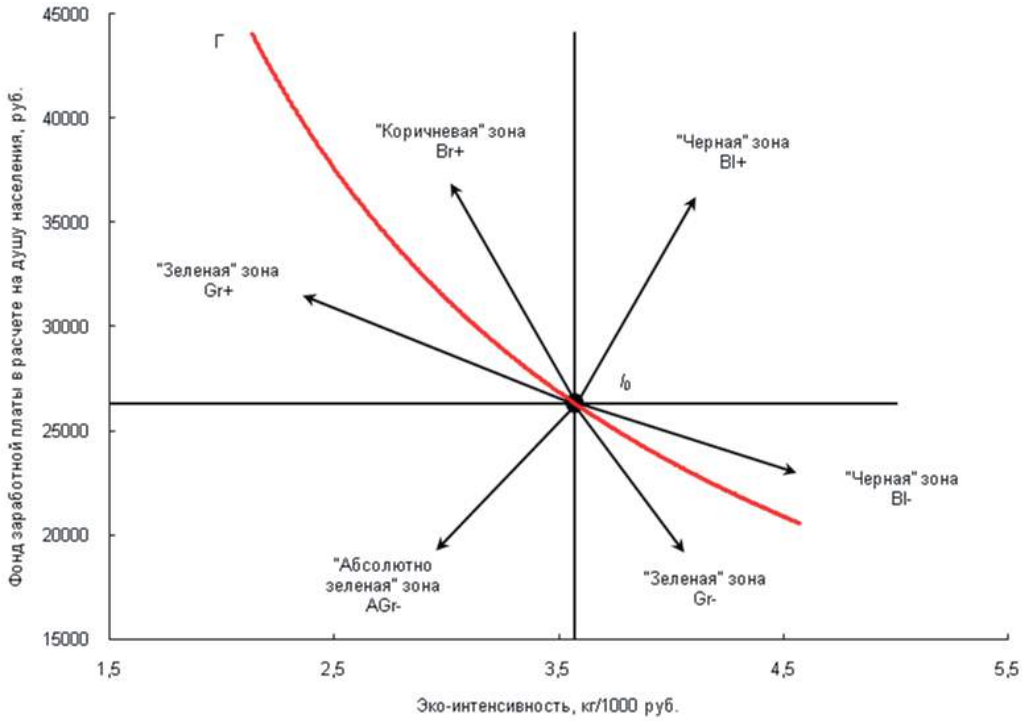



**Рисунок 1. Эколого-экономические зоны в концепции «зеленого роста».**
**Figure 1. Ecological and economic zones in the concept of "green growth".**

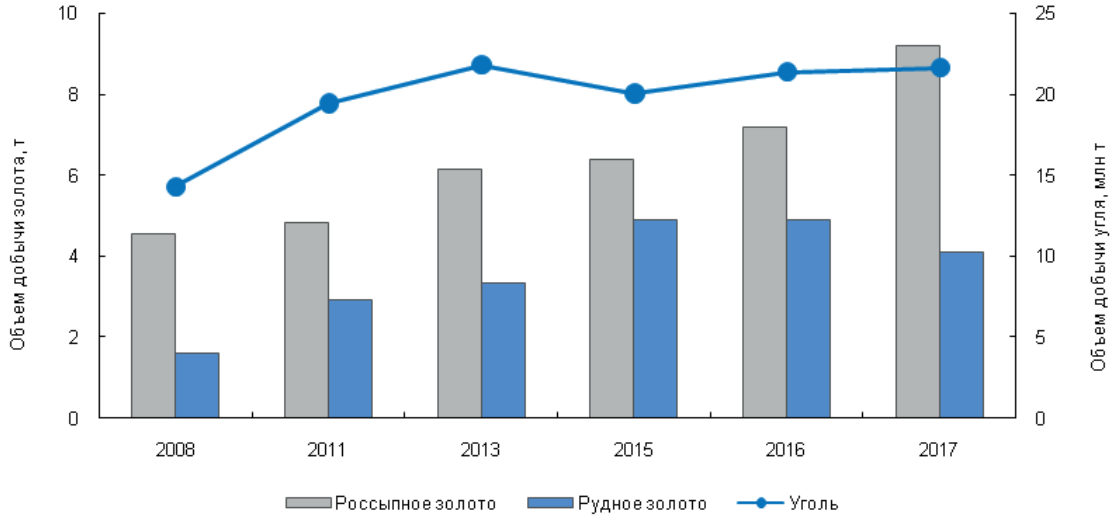



**Рисунок 2. Объемы добычи минерально-сырьевых ресурсов в Забайкальском крае.**
**Figure 2. Volumes of extraction of mineral resources in the Zabaykalsky Krai.**

6) Абсолютно «зеленая» зона (AGr–) – для муниципальных образований, попавших в эту зону, оба экологических показателя ниже, т. е. лучше средних по региону, однако уровень социально-экономического развития также ниже.

В данной работе использованы официальные данные Территориального органа Федеральной службы государственной статистики по Забайкальскому краю[1] (стоимостные показатели были приведены к сопоставимому виду; в качестве базового периода был выбран 2011 г.). Характеристиками уровня социально-экономического развития муниципальных образований в исследовании выступают следующие показатели: среднегодовой фонд начисленной заработной платы работников организаций и объем отгруженных товаров собственного производства, выполненных работ и услуг собственными силами. В качестве показателя экологической нагрузки используется объем выбросов загрязняющих веществ от стационарных источников в атмосферу. Другие виды негативного воздействия на окружающую среду (такие, как сброс загрязненных сточных вод, размещение отходов производства и потребления) в исследовании не рассматривались ввиду неполноты или отсутствия необходимой для анализа информации.

## Результаты и их обсуждение

Наиболее существенное негативное воздействие на окружающую среду в Забайкальском крае оказывают добывающая и электроэнергетическая отрасли промышленности. Производство электрической и тепловой энергии в регионе осуществляется большей частью на угольных станциях, в структуре выбросов которых присутствуют такие загрязнители, как твердые частицы (сажа), диоксид серы, оксиды азота и угарный газ. В 2016 г. на предприятия энергетики приходилось 58 % общего объема выбросов загрязняющих веществ, поступивших в атмосферный воздух от стационарных источников[2]. В приграничном регионе активно развивается добывающий сектор экономики, вклад которого в валовую добавленную стоимость за последнее десятилетие увеличился вдвое[3].Представленные на рис. 2 данные свидетельствуют о том, что в последние годы в Забайкальском крае наблюдался заметный рост объемов добычи золота и угля: в два и полтора раза соответственно (по отношению к 2008 г.). Также заметно увеличилось производство серебряного, свинцового, вольфрамового и цинкового концентратов[4]. Вместе с тем за рассматриваемый временной интервал количество отходов производства и потребления, большая часть которых образуется в процессе добычи и переработки природных ресурсов (98 % общего объема в 2016 г.), выросло в 2,6 раза.

Проанализируем распределение муниципальных образований Забайкальского края по эколого-экономическим зонам (рис. 3, 4). В 2016 г. несколько муниципальных районов попали в неблагополучные «черные» зоны Bl+ и Bl–, которые характеризуются более высокой подушевой экологической нагрузкой и эко-интенсивностью: всего восемь по двум социально-экономическим факторам. В «коричневой» зоне Br+ относительное социо-эколого-экономическое благополучие (т. е. более высокие подушевые социально-экономические показатели) имеет место при более низкой эко-интенсивности, т. е. при более низких, чем в среднем по региону, объемах выбросов в расчете на 1000 руб. экономических результатов. В этой группе оказалось четыре муниципальных района: Каларский, Могочинский, Петровск-Забайкальский и Газимуро-Заводский районы. В благополучной «зеленой» зоне Gr+, где все три изучаемых показателя лучше средних по региону, сосредоточились семь муниципальных образований (включая краевой центр – г. Чита). Большая часть муниципальных районов распределилась по «зеленым» зонам Gr– и Agr–, т. е. уровень социально-экономического развития в них ниже среднего по региону.

Из представленных в таблице данных видно, что некоторые муниципальные образования улучшили свое эколого-экономическое положение по отношению к 2011 г. Например, г. Чита, Карымский, Нерчинско-Заводский и Чернышевский

[1]Интернет-публикации Забайкалкрайстата. URL: http://www.chita.gks.ru:8080/bgd_site
[2]Основные показатели охраны окружающей среды. URL: http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_main/rosstat/ru/statistics/publications/catalog/doc_1140094699578
[3]Структура ВРП по отраслям экономики (в текущих ценах; в процентах к итогу). URL: http://www.gks.ru/free_doc/new_site/vvp/tab-vrp2.htm
[4]Забайкальский край-2017. Чита: Забайкалкрайстат, 2018. С. 174.

**Распределение муниципальных образований Забайкальского края по эколого-экономическим зонам.**
**Distribution of municipalities of the Zabaykalsky Krai by ecological and economic zones.**

| Эко-интенсивность | Зона | Муниципальные образования 2011 | Муниципальные образования 2016* |
|---|---|---|---|
| Выбросы загрязняющих веществ от стационарных источников /1000 руб. ФЗП | | «Черные» зоны | |
| | Bl + | 2 муниципальных образования: Краснокаменский, Чернышевский | 2 муниципальных образования: Краснокаменский, Тунгиро-Олекминский |
| | Bl – | 5 муниципальных образований: Оловяннинский, Петровск-Забайкальский, Приаргунский, Тунгиро-Олекминский, Шилкинский | 4 муниципальных образования: Александрово-Заводский, Оловяннинский, Петровск-Забайкальский, Сретенский |
| | | «Коричневая» зона | |
| | Br + | 3 муниципальных образования: г. Чита, Каларский, Могочинский | 3 муниципальных образования: Газимуро-Заводский, Каларский, Могочинский |
| | | «Зеленые» зоны | |
| | Gr + | 3 муниципальных образования: Газимуро-Заводский, Забайкальский, Хилокский | 5 муниципальных образований: г. Чита, Забайкальский, Карымский, Нерчинско-Заводский, Чернышевский |
| | Gr –, Agr – | 19 муниципальных образований | 17 муниципальных образований |
| Выбросы загрязняющих веществ от стационарных источников /1000 руб. объема отгруженных товаров, работ и услуг | | «Черные» зоны | |
| | Bl + | 2 муниципальных образования: Краснокаменский, Оловяннинский | 3 муниципальных образования: Александрово-Заводский, Краснокаменский, Оловяннинский |
| | Bl – | 6 муниципальных образований: Каларский, Могочинский, Приаргунский, Тунгиро-Олекминский, Чернышевский,Шилкинский | 3 муниципальных образования: Каларский, Сретенский, Тунгиро-Олекминский |
| | | «Коричневая» зона | |
| | Br + | 2 муниципальных образования: г. Чита, Петровск-Забайкальский | 3 муниципальных образования: Газимуро-Заводский, Могочинский, Петровск-Забайкальский |
| | | «Зеленые» зоны | |
| | Gr + | 3 муниципальных образования: Газимуро-Заводский, Калганский, Нерчинско-Заводский | 2 муниципальных образования: Калганский, Нерчинско-Заводский |
| | Gr –, Agr – | 19 муниципальных образований | 20 муниципальных образований |

* Без учета Хилокского района, по которому отсутствуют данные о количестве выбросов загрязняющих веществ от стационарных источников.

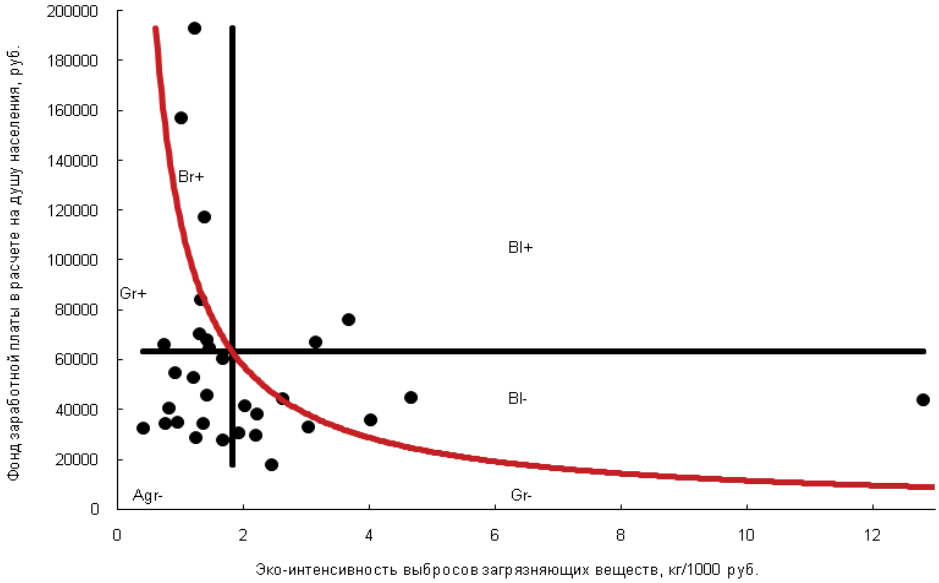



**Рисунок 3. Распределение муниципальных образований Забайкальского края по эколого-экономическим зонам в 2016 г.: объем выбросов загрязняющих веществ от стационарных источников в расчете на 1000 руб. фонда заработной платы.**
**Figure 3. Distribution of municipalities of the Zabaykalsky Krai by ecological-economic zones in 2016: emissions of pollutants from stationary sources per 1000 rubles of wages fund.**

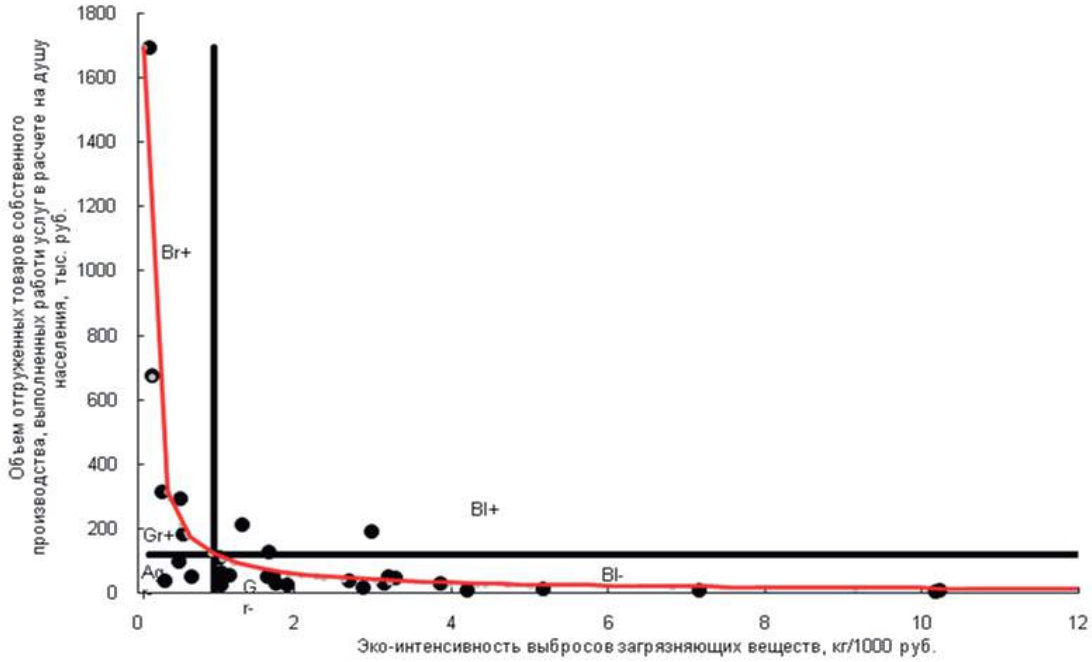



**Рисунок 4. Распределение муниципальных образований Забайкальского края по эколого-экономическим зонам в 2016 г.: объем выбросов загрязняющих веществ от стационарных источников в расчете на 1000 руб. отгруженных товаров собственного производства, выполненных работ и услуг собственными силами.**

**Figure 4. Distribution of municipalities of the Zabaykalsky Krai by ecological-economic zones in 2016: emissions of pollutants from stationary sources per 1000 rubles, shipped goods of own production, performed work and services using one's own resources.**

районы изменили свое положение по показателю «среднегодовой фонд заработной платы в расчете на душу населения». Также отмечена следующая позитивная тенденция: уменьшилось количество муниципальных районов в «черной» зоне Bl– по обоим исследуемым социально-экономическим показателям (4 против 5 в 2011 г. по фактору, определяющему благосостояние населения; 3 против 6 по фактору, характеризующему результаты хозяйственной деятельности предприятий).

Вместе с тем в некоторых муниципальных районах наблюдалось ухудшение ситуации за исследуемый временной интервал. Есть основания полагать, что на динамику рассматриваемых показателей оказывает влияние рост масштабов добычи и переработки природных ресурсов. Из представленных в таблице данных следует, что Газимуро-Заводский район «перешел» из благополучной «зеленой» зоны Gr+ в «коричневую» зону Br+. Это означает, что в 2016 г. количество выбросов в расчете на душу населения стало выше среднего по региону, тогда как в 2011 г. было ниже. Такая ситуация справедлива для обоих количественных факторов, характеризующих результаты социально-экономического развития. Рост подушевых социально-экономических показателей в данном муниципальном районе сопровождался заметным увеличением уровня негативного воздействия на атмосферу: за период с 2011 по 2016 г. объем выбросов от стационарных источников увечился в 2,3 раза. На территории Газимуро-Заводского района располагается восемь предприятий-природопользователей, оказывающих негативное воздействие на окружающую природную среду[5]. К числу крупных добывающих предприятий относятся ОАО «Ново-Широкинский рудник» и запущенный в эксплуатацию в 2017 г. Быстринский ГОК[6]. ОАО «Ново-Широкинский рудник» является лидером по добыче полиметаллов в Забайкальском крае, который в настоящее время активно наращивает объемы производства[7].

Некоторые муниципальные районы (например, Краснокаменский, Петровск-Забайкальский, Каларский и Тунгиро-Олекминский) стабильно остаются в неблагополучных «черных» зонах. Это свидетельствует о том, что жители данных территорий живут в условиях повышенной антропогенной нагрузки (как общей, так и удельной). Отдельно стоит упомянуть Оловяннинский район, который стабильно входит в «черную» зону Bl– и характеризуется самой высокой эко-интенсивностью выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от стационарных источников. Именно в этом муниципальном районе находится крупнейшая в регионе тепловая электростанция – Харанорская ГРЭС, которая обеспечивает 16 % общего объема эмиссий загрязняющих веществ в Забайкальском крае (по данным за 2015 г.).

## Заключение

В данном исследовании были изучены тренды социо-эколого-экономического развития муниципальных районов одного из приграничных регионов – Забайкальского края с позиции концепции «зеленой» экономики. Полученные ре-

[5]Среднесрочный план социально-экономического развития муниципального района «Газимуро-заводский район» Забайкальского края на период 2017–2021 гг. URL: http://gazim-zavod.ru/files/economika/2016/СРПСЕР%202017-2021/plan_CEP.docx
[6]«Норникель» запустил Быстринский ГОК стоимостью $1,5 млрд. URL: https://www.rbc.ru/business/31/10/2017/59f70c0e9a794707ec033d1d
[7]Highland Gold Mining Limited. Annual Report and Accounts 2017. URL: http://www.annualreports.com/HostedData/AnnualReports/PDF/LSE_HGM_2017.pdf

зультаты могут приниматься во внимание при определении приоритетов и направлений социально-экономического развития региона, а также рассматриваться как стартовые условия при реализации проектов приграничного сотрудничества. Использование данного инструментария для оценки качества экономического роста позволяет своевременно выявить негативные тенденции в развитии социо-эколого-экономических систем и разработать дополнительные меры со стороны органов государственной власти, что в конечном итоге будет способствовать выходу на траекторию «зеленого» роста в регионе.

*Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных исследований СО РАН (XI.174.1)*

ЛИТЕРАТУРА

1. Pyzhev A. I., Syrtsova E. A., Pyzheva Yu. I., Zander E. V. Sustainable development of Krasnoyarsk Krai: new estimates // Журнал СФУ. Сер. «Гуманитарные науки». 2015. Т. 8, № 11. С. 2590–2595.
2. Shang Y., Si Y., Zeng G. Black or green? Economic growth patterns in China under Low Carbon Economy Targets // Journal of Resources and Ecology. 2015. № 6 (5). P. 310–317. https://doi.org/10.5814/j.issn.1674-764x.2015.05.004
3. Wursthorn S., Poganietz W.-R., Schebek L. Economic-environmental monitoring indicators for European countries: A disaggregated sector-based approach formonitoring eco-efficiency // Ecological Economics. 2011. Vol. 70, issue 3. P. 487–496. https://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2010.09.033
4. Бобылев С. Н., Соловьева С.В., Ситкина К.С. Индикаторы устойчивого развития Уральского региона // Экономика региона. 2013. № 2. С. 10–17. https://doi.org/10.17059/2013-2-1
5. Рюмина Е. В. Экологически скорректированный ВВП: сферы использования и проблемы оценки // Экономика региона. 2013. № 4. С. 107–115. https://doi.org/10.17059/2013-4-10
6. Экологические индикаторы качества роста региональной экономики / под ред. И. П. Глазыриной, И. М. Потравного. М.: НИА-Природа, 2005. 306 с.
7. Clarke M., Islam S. Diminishing and negative welfare returns of economic growth: an index of sustainable economic welfare (ISEW) for Thailand // Ecological Economics. 2005. № 54. P. 81–93. https://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2004.10.003
8. Антонова Н. Е., Ломакина Н. В. Природно-ресурсные отрасли Дальнего Востока: новые факторы развития // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. 2018. Т. 11, № 1. С. 43–56. https://doi.org/10.15838/esc.2018.1.55.3
9. Глазырина И. П., Калгина И. С., Лавлинский С. М. Проблемы освоения минерально-сырьевой базы востока России и перспективы модернизации региональной экономики в условиях сотрудничества с КНР // Регион: экономика и социология. 2012. № 4 (76). С. 202–220.
10. Забелина И. А., Клевакина Е. А. Приграничное сотрудничество и его влияние на качество экономического роста (на примере Забайкальского края) // ЭКО. 2013. № 5 (467). С. 108–123.
11. Ломакина Н. В. Промышленное развитие Дальнего Востока России и Северо-Востока Китая: цели, результаты и возможности для сотрудничества // ЭКО. 2014. № 6 (480). С. 25–39.
12. Victor P. The Kenneth E. Boulding Memorial Award 2014: Ecological economics: A personal journey // Ecological Economics. 2015. Vol. 109. P. 93–100. https://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2014.11.009
13. Glazyrina I. P., Zabelina I. A. Spatial Heterogeneity of Russia in the Light of the Concept of a Green Economy: The Social Context // Geography and Natural Resources. 2018. Vol. 39 (2). P. 103–110. https://doi.org/10.1134/S1875372818020026
14. Glazyrina I. P., Faleichik L. M., Yakovleva K. A. Socioeconomic effectiveness and “green” growth of regional forest use // Geography and Natural Resources. 2015. Vol. 36 (4). P. 327–334. https://doi.org/10.1134/S1875372815040022
15. De Haan M. Accounting for goods and for bads. Voorburg: Statistics Netherlands, 2004. 216 p. Open Access

*Статья поступила в редакцию 13 мая 2018 г.*

УДК 332.1 https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-1-149-155

# Ecological and economic development of municipalities of the Zabaykalsky Krai in the context of "green" economy

**Irina Aleksandrovna Zabelina**[1,*],
**Yuliya Vladimirovna Kolotovkina**[2,**]

[1]Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology of the Siberian Branch of RAS
[2] Transbaikal State University, Chita, Russia

***The relevance of the study*** is due to the need to transition to a "green" economy, the idea of which is widely debated in the scientific environmental and economics literature. Nowadays, the level of negative environmental impact in many natural-resources regions of Russia significantly exceeds the average level within the country. This situation is typical of some areas of the East of the Russian Federation with a historically established raw material speciality of economy. The increase in the extraction and processing of natural resources in the designated areas (within the framework of implementation of joint Russian-Chinese projects) may contribute to strengthening of the environmental discomfort of the local population.
***The purpose of the study*** is to estimate the socio-ecological and economic development of municipalities of one of the border regions – Zabaykalsky Krai in the context of "green" economy using two quantitative factors characterizing the social and economic aspects of development: average annual wages fund per capita (determines the well-being of households); the volume of shipped goods of own production, performed work and services using one's own resources (determines the results of economic activities of enterprises). The key environmental and economic indicators used in this paper are eco-intensity indicators for the economic systems of municipal districts.
***The results of the study*** show that residents of many municipalities of the Zabaykalsky Krai live in conditions of increased anthropogenic stress. At the same time, indicators characterizing the level of socio-economic development are significantly lower than the regional average one. It is shown that the situation worsens in some municipal districts of the Zabaykalsky Krai according to the ratio of the considered socio-ecological-economic indicators for the considered time interval (2011–2016).

*Keywords:* "green" economy, emissions of pollutants from stationary sources, eco-intensity, ecological-economic zones, municipal districts.

*This work was carried out as part of the Basic Research Program of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (XI.174.1).*

## REFERENCES

1. Pyzhev A. I., Syrtsova E. A., Pyzheva Yu. I., Zander E. V. 2015, Sustainable development of Krasnoyarsk Krai: new estimates. *Journal of Siberian Federal University, Series Humanities*, vol. 8, no. 11, pp. 2590–2595.
2. Shang Y., Si Y., Zeng G. 2015, Black or green? Economic growth patterns in China under Low Carbon Economy Targets. *Journal of Resources and Ecology*, no. 6 (5), pp. 310–317. https://doi.org/10.5814/j.issn.1674-764x.2015.05.004
3. Wursthorn S., Poganietz W.-R., Schebek L. 2011, Economic-environmental monitoring indicators for European countries: A disaggregated sector-based approach formonitoring eco-efficiency. *Ecological Economics*, vol. 70, issue 3, pp. 487–496. https://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2010.09.033
4. Bobylev S.N., Solovyova S.V., Sitkina K.S. 2013, Indicators of sustainable development of the Ural region. *Ekonomika regiona* [Economy of the region], no. 2, pp. 10–17. (*In Russ.)* https://doi.org/10.17059/2013-2-1
5. Ryumina E. V. 2013, Environmentally adjusted GDP: spheres of use and problems of assessment. *Ekonomika regiona* [Economy of the region], no. 4, pp. 107–115. (*In Russ.)* https://doi.org/10.17059/2013-4-10
6. 2005, *Ekologicheskiye indikatory kachestva rosta regional'noy ekonomiki* [Environmental indicators of the quality of growth of the regional economy], ed. by I. P. Glazyrina, I. M. Potravny. Moscow, 306 p.
7. Clarke M., Islam S. 2005, Diminishing and negative welfare returns of economic growth: an index of sustainable economic welfare (ISEW) for Thailand. *Ecological Economics*, no. 54, pp. 81–93.
8. Antonova N. E., Lomakina N. V. 2018, Natural resource sectors of the Far East: new factors of development. *Ekonomicheskiye i sotsial'nyye peremeny: fakty, tendentsii, prognoz* [Economic and social changes: facts, trends, forecast], vol. 11, no. 1, pp. 43–56. (*In Russ.)* https://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2004.10.003
9. Glazyrina I. P., Kalgina I. S., Lavlinsky S. M. 2012, Problems of development of the mineral resource base of Eastern Russia and the prospects for modernization of the regional economy in the context of cooperation with the PRC. *Region: ekonomika i sotsiologiya* [Region: Economics and Sociology], no. 4 (76), pp. 202–220. (*In Russ.)* https://doi.org/10.15838/esc.2018.1.55.3
10. Zabelina I. A., Klevakina E. A. 2013, Cross-border cooperation and its impact on the quality of economic growth (using the Zabaykalsky Krai as an example). *EKO* [ECO], no. 5 (467), pp. 108–123. (*In Russ.)*
11. Lomakina N. V. 2014, Industrial development of the Russian Far East and Northeast China: goals, results and opportunities for cooperation. *EKO* [ECO], no. 6 (480), pp. 25–39. (*In Russ.)*
12. Victor P. The Kenneth E. 2015, Boulding Memorial Award 2014: Ecological economics: A personal journey. Ecological Economics. Vol. 109, pp. 93–100. https://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2014.11.009
13. Glazyrina I. P., Zabelina I. A. 2018, Spatial Heterogeneity of Russia in the Light of the Concept of a Green Economy: The Social Context. *Geography and Natural Resources*, vol. 39 (2), pp. 103–110. https://doi.org/10.1134/S1875372818020026
14. Glazyrina I. P., Faleichik L. M., Yakovleva K. A. 2015, Socioeconomic effectiveness and "green" growth of regional forest use. *Geography and Natural Resources*, vol. 36 (4), pp. 327–334. https://doi.org/10.1134/S1875372815040022
15. De Haan M. 2004, Accounting for goods and bads. Voorburg: Statistics Netherlands, 216 p. Open Access

*The article was received on May 13, 2018*

* ✉ i_zabelina@mail.ru
https://orcid.org/0000-0003-4464-2593
**kolotovkina.yulya@mail.ru

УДК 330.15 https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-1-156-161

# Сбалансированное природопользование: подходы к оценке

**Владимир Григорьевич ЛОГИНОВ***
**Валерий Васильевич БАЛАШЕНКО****

Институт экономики УрО РАН, Россия, Екатеринбург

***Актуальность*** перехода к устойчивому сбалансированному развитию является в современных условиях важнейшей целью как всего человечества, так и отдельных стран, в то же время методология и методический инструментарий измерения этого процесса до сих пор остаются в стадии становления.
***Цель исследования*** – обобщение и анализ имеющегося методического обеспечения по оценке уровня сбалансированности и выявление наиболее достоверного методического инструментария, рекомендуемого для использования в современных условиях.
***Результаты***: в процессе исследования были выделены три группы исследователей, отличающихся спецификой своих методических подходов к установлению степени сбалансированности. Первая группа объединяет авторов, рассматривающих сбалансированность развития с позиции баланса интересов поколений и решаемых задач, ориентированных, с одной стороны, на социально-экономическое развитие территорий, с другой – на охрану природы. Отсутствие каких-либо рекомендаций по формированию оценочного инструментария позволяет констатировать их нереализуемость в практическом плане. Ко второй группе относятся исследователи, рекомендующие методический инструментарий по оценке сбалансированности с позиции баланса целей экономической, экологической и социальной подсистем с помощью соизмерения экономического эффекта и экономического ущерба, обусловленного социальными и экологическими последствиями. Наиболее многочисленна третья группа исследователей, рекомендующая установление степени сбалансированности на основе соизмерения локальных потенциалов. В большинстве случаев для оценки сбалансированности потенциалов рекомендуется использование системы индикаторов и установление степени сбалансированности на основе их группировки. Реже исследователи обращаются к интегральным индикаторам. Малочисленны исследования сбалансированности на основе соизмерения производственного и природного потенциала с использованием энергетического подхода. Выявление преимуществ и недостатков рассматриваемых методических подходов позволило рекомендовать в качестве наиболее достоверного среди них последнего из анализируемых.
***Применение результатов***: выявленные недостатки и преимущества методических рекомендаций по оценке сбалансированности природопользования могут быть учтены при идентификации уровня сбалансированности в процессе планирования и организации хозяйственной деятельности, в том числе природопользования на федеральном и региональном уровнях.

*Ключевые слова*: природопользование, сбалансированность, интересы, цели, потенциалы, соизмерение, устойчивое развитие, методические подходы, оценка.

## Введение

В 1992 г. на конференции в Рио-де-Жанейро была принята установка на изменение модели развития. Осознание надвигающейся опасности в виде экологической катастрофы предопределило признание необходимости перехода на новый путь развития, определяемый как устойчивое развитие. Модель устойчивого (сбалансированного) развития предполагает удовлетворение жизненных потребностей настоящего поколения людей без того, чтобы будущие поколения были лишены такой возможности из-за исчерпания природных ресурсов и деградации окружающей среды [1, 2]. В числе основных положений Концепции устойчивого развития центральное место занимает условие «придания развитию сбалансированного и долговременного характера». Согласно «Концепции перехода РФ к устойчивому развитию» (1996), последнее обеспечивает «сопряженное, внутренне сбалансированное функционирование триады – природы, населения, хозяйства», а в работе [3] оно рассматривается как «сбалансированное функционирование трех составляющих: качества окружающей среды, качества жизни и экономического развития». Требование учета и планирования мероприятий по реализации поставленных задач, связанных с переходом на устойчивое развитие, предусматривает уточнение понятия сбалансированности по отношению к природопользованию, что открывает возможности ее оценки [4].

## Методы исследования

В процессе исследования применялись методы научного обобщения, а также методы системного, логического, сравнительного анализа.

## Результаты

Исходным положением выполнения исследований служит характеристика понятия сбалансированности. Сбалансированность в научной среде определяется как достижение равновесия между двумя противоположно направленными силами. Баланс – сохранение равновесия, сбалансированность – достижение состояния баланса. Условием сбалансированности при устойчивом развитии является баланс экологической, экономической и социальной или экологической и социально-экономической подсистем, т. е. экологически устойчивое, экономически эффективное природопользование [5]. Уровень устойчивости в этом случае характеризует сбалансированность всех трех рассматриваемых аспектов. Обобщение и анализ методических подходов к обеспечению сбалансированности позволяет объединить их в три группы (рис. 1).

Первая группа предполагает объединение исследователей, характеризующих оценку сбалансированности с позиции баланса интересов и решаемых задач.

Так, авторы работы [6] рассматривают баланс интересов поколений в рамках экологической парадигмы в качестве идеологии концепции устойчивого развития. При этом интересы настоящего и будущих поколений оцениваются с по-

* log-wg@rambler.ru
https://orcid.org/0000-0002-2466-5686
**bala10@mail.ru

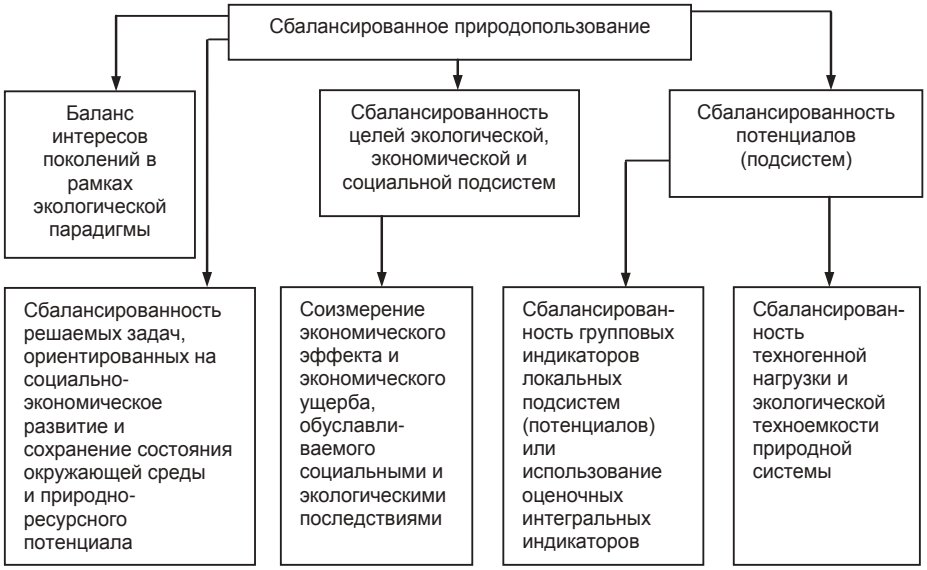



**Рисунок 1. Методические подходы к оценке сбалансированности природопользования.**
**Figure 1. Methodical approaches to evaluating sustainability of natural resource use.**

**Рисунок 2. Оценка сбалансированности природопользования при социально-экономическом подходе.**
**Figure 2. Evaluation of sustainability of natural resource use using the social-economic approach.**

зиции сохранения качества окружающей среды и наличия в необходимом количестве природных ресурсов, позволяющих удовлетворять имеющиеся потребности. В свою очередь, О. Н. Полищук считает, что модель устойчивого развития предполагает «сбалансированное решение задач социально-экономического и демографического развития на перспективу, сохраняя благоприятное состояние окружающей среды и природно-ресурсного потенциала, удовлетворяющего жизненные потребности населения» [7].

Вторая группа исследователей связывает сбалансированность природопользования со сбалансированностью целей подсистем экологической, экономической и социальной в процессе управления природных ресурсов. В. И. Бутяев рассматривает сбалансированное природопользование как «составную часть научного управления экономическим развитием, нацеленным на сопряженное достижение социальных, экономических и экологических целей не только в данный период времени, но в перспективе» [8]. О соизмерении целей идет речь в работах [9, 10, 11]. Рекомендуемый исследователями метод выявления степени сбалансированности при социально-экономическом подходе ориентирован на соизмерение получаемого при освоении природного потенциала экономического эффекта и экономического ущерба, обусловленного формируемыми при освоении экологическими и социальными последствиями, что наглядно подтверждает рис. 2.

Геоэкосоциоэкономический подход, формирование которого обусловлено сближением социально-экономического и геоэкологического подходов, также в числе основополагающих принципов предусматривает «учет целевых установок социальной, экологической и экономической подсистем» [10] при принятии управленческих решений относительно освоения природных ресурсов в условиях перехода к устойчивому развитию [12].

С учетом, что геоэкосоциоэкономический подход представляет собой экологизированный социально-экономический подход, рекомендации по установлению степени сбалансированности целей остаются прежними [13].

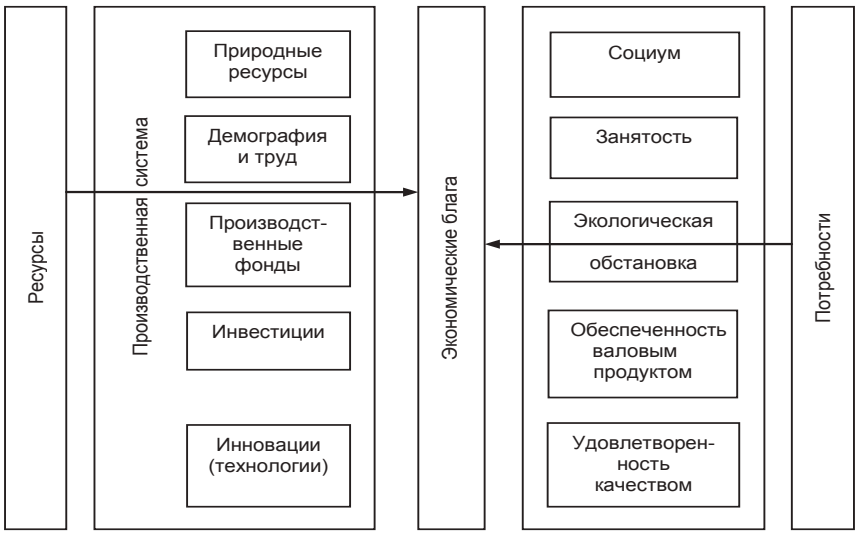



**Рисунок 3. Экономическая модель региона [11].**
**Figure 3. Economic model of the region [11].**

Наиболее широкое использование (третья группа исследователей) на сегодня имеет оценка степени сбалансированности природопользования через соизмерение потенциалов (подсистем), что дает, в конечном счете, рекомендации по определению сбалансированности локальных потенциалов, в числе которых чаще всего экологический, экономический и социальный [14]. Состав подсистем (потенциалов) может быть расширен за счет детализации последних. В частности, авторы [15] помимо социального, экологического и экономического потенциалов учитывают еще и ресурсный. П. В. Гуськов предлагает при оценке сбалансированности учитывать природно-ресурсный, социально-демографический, производственный, технологический, инфраструктурный и инвестиционный потенциалы, исходя из экономической модели региона (рис. 3) [16].

Для оценки сбалансированности авторами предлагается система факторов, характеризующих каждую из подсистем (потенциалов), оцениваемых с помощью показателей, на базе которых определяются частные индикаторы, а в последующем – групповые. Соизмерение групповых индикаторов позволяет делать вывод о степени сбалансированности потенциалов и, в конечном счете, о сбалансированности природопользования. Возможен и иной методический подход, когда при оценке сбалансированности используются интегральные индикаторы, формирующиеся на основе групповых индикаторов. Определение последних выполняется путем расчета как среднеарифметического, среднегеометрического и др. [17, 18]. Несомненный интерес представляет метод динамических нормативов, который достаточно успешно применяется при оценке сбалансированности природопользования на региональном уровне [19]. Он предусматривает использование темповых расчетных показателей (возможным является применение как прогнозных, так и ретроспективных данных). Сравнение фактической динамики показателей с эталонной позволяет определить уровень сбалансированности по каждому из локальных потенциалов и, в конечном счете, – интегральный уровень сбалансированности природопользования.

Наибольший интерес представляют исследования, в которых оценивается сбалансированность потенциалов с использованием энергетического подхода, когда энергетические параметры биосферы (природный потенциал) сопоставляются с энергетическими параметрами деятельности человека (производственного потенциала). В работах Т. А. Акимовой и В. В. Хаскина [20] обосновывается сбалансированность территориальных природно-социальных комплексов на основе соизмерения природной техносферы и экологической техноемкости, предлагается методический подход по выполнению количественных оценок указанных показателей. Практические примеры реализации данного подхода можно найти в ряде работ исследователей, в том числе Г. Одума, А. С. Миндрина, Б. И. Кочурова, К. А. Шуркиной, В. А. Бровкина, Е. А. Денисенко, И. П. Глазыриной, М. А. Семенова, Н. Р. Яхина и др.

Энергетический подход позволяет обосновывать предельно допустимые техногенные нагрузки, определяемые социально-экономическим развитием региона, нацеленным на обеспечение соответствующего уровня жизни населения [21]. В современных условиях данный подход к определению уровня сбалансированности является наиболее обоснованным, позволяющим сохранить «здоровье» экосистем, их способность к самовосстановлению при эффективном освоении природных ресурсов.

## Обсуждение

Исследователи, относящиеся к первой группе, рассматривают соизмерение интересов поколений, а также сбалансированость решаемых задач, ориентированных на социально-экономическое развитие и охрану окружающей среды в качестве основы устойчивого (сбалансированного) развития. Однако методический инструментарий, позволяющий оценить степень выполнения обозначенных условий в любом из этих случаев, отсутствует. Речь идет лишь о формировании основополагающих условий (принципов) сбалансированности. Как оценить, например, сбалансированность решаемых задач? Приходится лишь догадываться. Таким образом, на сегодня оценка сбалансированности природопользования с позиции баланса интересов или решаемых задач не имеет методического обеспечения и в практическом плане остается нереализуемой.

Исследователи, объединенные во вторую группу, предлагают конкретные рекомендации по установлению сбалансированности природопользования, требующие выполнения расчетов по определению доходности освоения природных ресурсов и определения экономического ущерба, обусловленного появлением экологических и социальных последствий, сопровождающих процесс освоения. В качестве недостатка следует отметить отсутствие общепризнанных методических подходов к расчету экономического ущерба и научно обоснованных рекомендаций по учету ущерба, не получившего стоимостного выражения.

Наибольшая группа охватывает исследователей, рассматривающих сбалансированность с позиции баланса локальных потенциалов. Авторы в этой ситуации предполагают, что наличие сбалансированности каждого из потенциалов свидетельствует о сбалансированности всей эколого-экономической системы, функционирование которой рассматривается как процесс природопользования. В числе недостатков: во-первых, субъективизм в выборе оцениваемых потенциалов и факторов, влияющих на уровень сбалансированности, их подбор чаще всего научно не обоснован и объясняется лишь возможностью наличия информации (наличия в числе статистических данных). Во-вторых, расчет индикаторов предполагает сопоставление фактических показателей с плановыми или нормативными значениями при том, что плановые показатели никоим образом не могут рассматриваться как научно обоснованные показатели, обеспечивающие сбалансированность.

Использование метода динамических нормативов несет в себе еще большее количество недостатков, так как помимо субъективизма в выборе потенциалов и факторов во внимание принимается направленность темпов изменения показателей и не учитываются количественные соизмерения темпов. Не меняет картины и использование интегральных индикаторов.

Использование энергетического подхода при установлении степени сбалансированности природопользования предусматривает совместную работу экологов и экономистов при выполнении эколого-энергетического анализа и установления экологической выносливости территорий. Данный подход наиболее достоверен при определении сбалансированности, так как базируется на оценке ассимиляционного потенциала территории.

## Выводы

Считается, что сбалансированность природопользования наиболее достоверно может быть оценена с использованием энергетического подхода. Экспресс-оценка не исключает использования и иных методических подходов.

*Статья подготовлена в соответствии с планом НИР ФГБУН «Институт экономики УрО РАН» на 2019–2021 гг.*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Angelstam P., Elbakidze M., Axelsson R., Khoroshev A., Pedroli B., Tysiachniouk M., Zabubenin E. Model forests in Russia as landscape approach: Demonstration projects or initiatives for learning towards sustainable forest management? // Forest Policy and Economics. 2019. Vol. 101. P. 96–110. https://doi.org/10.1016/j.forpol.2019.01.005
2. Rossinskaya M. V., Tatuev A. A., Rokotyanskaya V. V., Khukhlaev D. D., Valenteychik D. V. Environmental and economic security management // International Journal of Economic Perspectives. 2017. Vol. 11, issue 4. P. 678–691.
3. Сергиенко О. И. Экологическое природопользование. Ростов н/Д: Феникс, 2004. 320 с.
4. Игнатьева М. Н. The notion of balance evolution in the natural resource management // Изв. вузов Горный журнал. 2018. № 6. С. 85–92.
5. Weißhuhn P. Indexing the vulnerability of biotopes to landscape changes // Ecological Indicators. Vol. 102. 2019. P. 316–327.
6. Касимов Н. Я., Мазуров Ю. Л., Туканов В. С. Концепция устойчивого развития: восприятие в России // Вестник РАН. 2004. Т. 74, № 1. С. 28–36.
7. Полищук О. Н. Белгородская область на пути ноосферного развития // Проблемы региональной экологии. 2016. № 3. С. 157–161.
8. Бутяев В. И. Сбалансированное природопользование в Каспийском регионе: проблемы и перспективы: дис. … канд. экон. наук. 2002. 154 с.
9. Козаков Е. М., Пахомов В. П., Игнатьева М. Н. Социально-экономическое обоснование освоения минеральных ресурсов. Екатеринбург: Ин-т экономики УрО РАН, 1992. 112 с.
10. Развитие системности в освоении природного потенциала северных малоизученных территорий / под ред. А. И. Татаркина. Екатеринбург: Ин-т экономики УрО РАН, 2015. 317 с.
11. Malikh O. E., Konovalova M. E., Kuzmina O. Y., Michailov A. M. The problem of energy saving and its solution in the conditions of formation of a new model of economic development In: Ashmarina S., Mesquita A., Vochozka M. (eds.). Digital Transformation of the Economy: Challenges, Trends and New Opportunities. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2018. Vol. 908. P. 79–87. https://doi.org/10.1007/978-3-030-11367-4_7
12. Selwood K. E., Cunningham S. C., Mac Nally, R. Beyond refuges: Identifying temporally dynamic havens to support ecological resistance and resilience to climatic disturbances // Biological Conservation. 2019. Vol. 233. P. 131–138. https://doi.org/10.1111/geb.12305
13. Игнатьева М. Н., Литвинова А. А. Экологизация социально-экономического подхода к освоению природных ресурсов // Изв. вузов Горный журнал. 2015. № 3. С. 57–64.
14. Устойчивое развитие: методология и методические измерения / под ред. С. Н. Бобылева. М.: Экономика, 2011. 358 с.
15. Полянская И. Г., Юрак В. В. Сбалансированность природопользования региона: оценка методом динамических нормативов // Экономика региона. 2018. № 3. С. 851–869.
16. Гуськов П. В. Исследование факторов сбалансированного регионального развития // Экономика Северо-Запада: проблемы и перспективы развития. 2016. № 2/3. С. 120–126.
17. Алтынбаев Р. З. Сбалансированное развитие субъектов РФ – новый вектор региональной политики. URL: http://federulbook.ru/files/FS/Soderyanie/FS–21/IX/Altinbaev.pdf
18. Ускова Т. В. Теория и методология управления устойчивым социально-экономическим развитием: автореф. дис. … д-ра экон. наук. Вологда. 2010. 38 с.
19. Третьякова Е. А. Оценка устойчивости развития эколого-экономических систем: динамический метод // Проблемы прогнозирования. 2015. № 4. С. 143–154.
20. Акимова Т. А., Хаскин В. В. Экология. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2006. 495 с.
21. Кочуров Б. И., Марунич Н. А. Эколого-энергетический анализ экосистем. М.: ИНФРА-М, 2016. 144 с.

*Статья поступила в редакцию 13 декабря 2018 г.*

УДК 330.15 https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-1-156-161

# Sustainable natural resource use: approaches to evaluation

**Vladimir Grigor'evich LOGINOV***
**Valeriy Vasil'evich BALASHENKO****

Institute of Economics of the Ural Branch of RAS
Ekaterinburg, Russia

Nowadays, the urgency of transition to sustainable development is the most important goal of humanity and individual countries as well. Although, the methodology and methodological tools for measuring this process are still in their infancy.
***The purpose of the study*** is to summarize and analyze the existing methodological support for evaluating the level of balance and to identify the most reliable methodological tools recommended for use in modern conditions.
***Results***. during the study, three groups of researchers were distinguished. They differ in the specifics of their methodological approaches to establishing the degree of balance. The first group unites authors who consider the balance of development from the standpoint of the balance of interests of generations and the tasks to be solved, who are focused, on the one hand, on the social-economic development of territories, and on the other hand, on nature conservation. The absence of any recommendations concerning formation of valuation tools allows us to state their impracticality. The second group includes researchers who recommend methodological tools for estimating sustainability from the standpoint of balance of the goals for economic, environmental and social subsystems by comparing the economic effect and economic damage caused by social and environmental consequences. The third group of researchers is the most numerous. They recommend to establish the degree of balance based on a comparison of local potentials. In most cases, the use of the system of indicators while establishing the degree of sustainability based on their grouping are recommended to evaluate potentials balance. Less commonly, researchers turn to integral indicators. There are few studies of balance based on comparison of production and natural potential using the energy approach. The identification of advantages and disadvantages of the considered methodological approaches made it possible to recommend the latter to be the most reliable among them.
***Application of results:*** The determined shortcomings and benefits of methodological recommendations for estimating sustainability of natural resource use can be taken into consideration when identifying the level of balance while planning and organizing economic activity, including environmental management at the federal and regional levels.

*Keywords*: natural resource use, sustainability, interests, goals, potentials, comparison, sustainable development, methodological approaches, evaluation.

## Acknowledgements

This paper was prepared in accordance with the approved Plan of research of the Institute of Economics at the Russian Academy of Sciences (Ural branch) for 2019–2021.

## REFERENCES

1. Angelstam P., Elbakidze M., Axelsson R., Khoroshev A., Pedroli B., Tysiachniouk M., Zabubenin E. 2019, Model forests in Russia as landscape approach: Demonstration projects or initiatives for learning towards sustainable forest management? *Forest Policy and Economics*, vol. 101, pp. 96–110. https://doi.org/10.1016/j.forpol.2019.01.005
2. Rossinskaya M. V., Tatuev A. A., Rokotyanskaya V. V., Khukhlaev D. D., Valenteychik D. V. 2017, Environmental and economic security management. *International Journal of Economic Perspectives*, vol. 11, issue 4, pp. 678–691.
3. Sergienko O. I. 2004, *Ekologicheskoye prirodopol'zovaniye* [Environmental management]. Rostov-on-Don, 320 p.
4. Ignatieva M. N. 2018, The notion of balance in the natural resource management. *News of the Higher Institutions. Mining Journal*, no. 6, pp. 85–92.
5. Weißhuhn P. 2019, Indexing the vulnerability of biotopes to landscape changes. *Ecological Indicators*, vol. 102, pp. 316–327.
6. Kasimov N. Ya., Mazurov Yu. L., Tukanov V. S. 2004, Concept of sustainable development: Russia's perspective. *Vestnik RAN* [Herald of the Russian Academy of Sciences], vol. 74, no. 1, pp. 28–36. (*In Russ.)*
7. Polishchuk O. N. 2016, Belgorod region on the path of noospheric development. *Problemy regional'noy ekologii* [Regional Environmental Issues], no. 3, pp. 157–161. (*In Russ.)*
8. Butyaev V. I. 2002, *Sbalansirovannoye prirodopol'zovaniye v Kaspiyskom regione: problemy i perspektivy* [Sustainable natural resource use in the Caspian region: problems and prospects], PhD thesis, 154 p.
9. Kozakov E. M., Pakhomov V. P., Ignatieva M.N. 1992, *Sotsial'no-ekonomicheskoye obosnovaniye osvoyeniya mineral'nykh resursov* [Social-economic substantiation of the development of mineral resources]. Ekaterinburg, 112 p.
10. 2015, *Razvitiye sistemnosti v osvoyenii prirodnogo potentsiala severnykh maloizuchennykh territori* [Mastering consistency in the development of natural potential of the northern poorly known territories], ed. by A. I. Tatarkin. Ekaterinburg, 317 p.
11. Malikh O. E., Konovalova M. E., Kuzmina O. Y., Michailov A. M. 2018, The problem of energy saving and its solution in the conditions of formation of a new model of economic development In: Ashmarina S., Mesquita A., Vochozka M. (eds.). Digital Transformation of the Economy: Challenges, Trends and New Opportunities. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 908, pp. 79–87. https://doi.org/10.1007/978-3-030-11367-4_7
12. Selwood K. E., Cunningham S. C., Mac Nally, R. 2019, Beyond refuges: Identifying temporally dynamic havens to support ecological resistance and resilience to climatic disturbances. *Biological Conservation*, vol. 233, pp. 131–138. https://doi.org/10.1111/geb.12305
13. Ignat'eva M. N., Litvinova A. A. 2015, Ecologization of the social-economic approach to the development of natural resources. *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal* [News of the Higher Institutions. Mining Journal], no. 3, pp. 57–64. (*In Russ*.)
14. 2011, *Ustoychivoye razvitiye: metodologiya i metodicheskiye izmereniya* [Sustainable development: methodology and methodical measurements], ed. by S. N. Bobylev. Moscow, 358 p.
15. Polyanskaya I. G. Yurak V. V. 2018, Balance of nature management in the region: evaluation by the method of dynamic normal. *Ekonomika regiona* [Economy of the region], no. 3, pp. 851–869. (*In Russ*.)

* ✉ log-wg@rambler.ru
https://orcid.org/0000-0002-2466-5686
**bala10@mail.ru

16. Guskov P. V. 2016, Study of factors of balanced regional development. *Ekonomika Severo-Zapada: problemy i perspektivy razvitiya* [Economy of the North-West: Issues and Prospects of Development], no. 2/3, pp. 120–126. (*In Russ.)*
17. Altynbaev R. Z. *Sbalansirovannoye razvitiye sub"yektov RF – novyy vektor regional'noy politiki* [The balanced development of the subjects of the Russian Federation is a new vector of regional policy]. URL: http://federulbook.ru/files/FS/Soderyanie/FS–21/IX/Altinbaev.pdf
18. Uskova T. V. 2010, *Teoriya i metodologiya upravleniya ustoychivym sotsial'no-ekonomicheskim razvitiyem* [Theory and methodology of sustainable social-economic development management. PhD thesis, 38 p.
19. Tretyakova E. A. 2015, Evaluation of sustainability of the development of ecological-economic systems: dynamic method. *Problemy prognozirovaniya* [Studies on Russian Economic Development], no. 4, pp. 143–154. (*In Russ.)*
20. Akimova T. A., Haskin V. 2006, Ekologiya [Ecology]. Moscow, 495 p.
21. Kochurov B. I., Marunich N. A. 2016, *Ekologo-energeticheskiy analiz ekosistem* [Ecological and energy analysis of ecosystems]. Moscow, 144 p.

*The article was received on December 13, 2018*

УДК 330.341.2(1):330.35 https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-1-162-170

# Роль институтов развития в наращивании инвестиционных ресурсов старопромышленных территорий

**Елена Николаевна СИДОРОВА***,
**Александр Валерьевич ТРЫНОВ****

Институт экономики УрО РАН, Россия, Екатеринбург

Статья посвящена исследованию проблем наращивания инвестиционного потенциала старопромышленных территорий как необходимого условия перехода экономики России на инновационный путь развития. Актуальность работы обусловлена отсутствием в госсекторе инвестиционных ресурсов, достаточных для решения поставленных задач. Сформулирована и подтверждена гипотеза, суть которой сводится к тому, что одним из основных способов обеспечения инновационного развития экономики России, ее отраслей, субъектов и муниципальных образований является объединение финансовых ресурсов государства и бизнеса. В качестве инструмента решения этой задачи в статье рассматривается создание специализированных организаций с государственным участием – институтов развития и использование механизмов государственно-частного партнерства (ГЧП).

***Цель статьи*** заключается в уяснении роли институтов развития в наращивании инновационного потенциала территорий, в том числе относящихся к числу старопромышленных, создании условий для формирования инфраструктуры, которая обеспечивает доступ венчурных фирм к необходимым ресурсам, в первую очередь – финансовым, а также использовании в их деятельности механизмов ГЧП.

***Результаты.*** Раскрыты теоретические основы и дана классификация институтов развития, проведен анализ современного состояния формирования и функционирования институтов развития в России. Предложен авторский подход к оценке эффективности их функционирования. Большое внимание в статье уделено развитию и расширению практики использования институтов развития для реализации проектов отработки техногенных месторождений. В качестве тезиса, имеющего научное и практическое значение, обосновано положение, о том, что оценка эффективности инвестиционных проектов должна осуществляться на основе учета мультипликативных эффектов от их реализации. Результаты исследования получены на основе использования методов сравнительного анализа и сопоставления накопленного опыта в различных регионах России.

Проведенное исследование позволило авторам сделать ряд выводов о том, что институты развития и механизмы ГЧП являются перспективным способом решения задач инновационного развития экономики и могут быть эффективно использованы при обосновании перспектив освоения ресурсов недр сырьевых территорий и разработки техногенных месторождений старопромышленных регионов.

*Ключевые слова:* институты развития, государственно-частное партнерство, освоение недр, оценка эффективности, критерии эффективности, мультипликативный эффект.

## Введение

Основой благополучия любого государства является эффективная поступательно развивающаяся экономика, мощный производственный потенциал, базирующийся на инвестировании передовых технологий и инновационных процессов. В развитых странах в периоды замедления экономического роста возрастают затраты на науку и технологическое переоснащение производства, поскольку переход на инновационные технологии – это не только достижения в области нового знания, но и мощный фактор наращивания экономического потенциала. Обусловлено это тем, что доходы от использования новых технологий значительно превышают расходы на их разработку и внедрение. Экономическая отдача инвестиций в инновации в среднем превышает окупаемость в любых других сферах применения финансовых ресурсов. Согласно опубликованным данным [1], в развитых странах на долю новых знаний, воплощаемых в новых технологиях, оборудовании, организации производства, приходится от 70 % до 85 % прироста валового внутреннего продукта (ВВП). Ускоренно растет вклад инновационной составляющей в прирост ВВП, который в США, например, увеличился с 31 % в 1980-е гг. до 34,6 % в начале XXI в.; в Японии соответственно с 30,6 до 42,3 %; в Европе – с 45,5 до 50 %. Развитые страны концентрируют у себя свыше 90 % мирового научного потенциала и контролируют 80 % глобального рынка высоких технологий, объем которого оценивается в 2,5–3 трлн долл.

Что касается России, то основные направления ее выхода на инновационный путь развития сформулированы в целом ряде основополагающих документов (*Распоряжение Правительства РФ «О концепции долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2020 года» от 17.11.2008 № 1662-р. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_82134; Прогноз долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации до 2030 (разработан Минэкономразвития России). URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_144190; Распоряжение Правительства РФ «Об утверждении Стратегии инновационного развития Российской Федерации на период до 2020 года» от 08.12.2011 № 2227-р. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_123444; Федеральный закон «О промышленной политике в Российской Федерации» от 31.12.2014 № 488-ФЗ. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_173119*). Согласно принятым документам, Россия в 2020-х гг. должна войти в пятерку стран-лидеров по объему ВВП (по паритету покупательной способности). Достижение этой цели означает, что к 2020 г. Россия должна занять 5-е место, т. е. поставлять около 10 % продукции на рынки высокотехнологичных товаров и интеллектуальных услуг в 5–7 и более секторах. Доля промышленных предприятий, осуществляющих технологические инновации, должна возрасти до 40–50 %, а доля инновационной продукции в объеме выпуска – до 25–35 %. Доля экономики знаний и высокотехнологичного сектора в ВВП должна составлять не менее 17–20 %. Решение настолько масштабных задач для современной российской экономики практически невозможно, поскольку объем финансовых ресурсов, который способна

* Katelen@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-6306-4074
**trynovv@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-2969-2536

предложить система финансовых институтов страны, неадекватен потребностям развития экономики. Что касается частного сектора, то его привлечение ограничивается высокими рисками и долгосрочностью соответствующих проектов. В связи с этим первостепенное значение приобретают вопросы выявления источников инвестирования и методов их вовлечения в инновационную деятельность как в целом по стране, так и в регионах.

Мировой и российский опыт показывает, что единственно возможным способом обеспечения поступления в экономику такого большого объема долгосрочных инвестиционных ресурсов являются меры, позволяющие объединить государственные ресурсы и финансовые возможности частного сектора. Накопленный отечественный опыт совместного решения проблем инвестирования инновационных проектов свидетельствует о взаимовыгодных условиях их реализации и для государства, и для частного бизнеса.

## Результаты исследования и область их применения

Вопрос о предназначении институтов развития как инструмента государственной политики по ускорению инновационных процессов, призванного способствовать наращиванию инвестиционного потенциала территорий на основе объединения финансовых возможностей государства и частного сектора, неоднократно обсуждался в научных публикациях. Развернутые доклады, посвященные данному вопросу, представлены Минэкономразвития России, Фондом развития промышленности (РФТР), НИФИ Министерства ифинансов России и др. О значимости институтов развития неоднократно говорилось в официальных документах, в частности, в Материалах к заседанию Совета по конкурентоспособности и предпринимательству при Правительстве Российской Федерации: «Передача этих функций от государства к институтам развития позволит перейти от механизма формального бюджетного перераспределения средств к реализации целеориентированных комплексных программ поддержки»[2].

Чаще всего институты развития рассматриваются как структуры, специально созданные для решения задач, которые не решаются рыночным путем. Так, в работе [3] под институтами развития понимаются «специализированные государственные или квазигосударственные организации, созданные для содействия экономическому развитию в определенных областях,… когда рыночные механизмы оказываются неадекватным способом решения экономических или социальных проблем», а авторы [4] под институтами инновационного развития понимают «созданные в государстве специфические социально-экономические системы со своей структурой, субъектами, закономерностями функционирования, которые устанавливают определенные правила инновационного поведения и ограничения («правила игры») для всех субъектов хозяйствования». В то же время в научной литературе понятие института развития также часто употребляется и в более широком смысле, не как специально созданные организации, а как институты, образующие институциональную среду, как общественные механизмы воздействия на социально-экономические процессы [5–7]. Не углубляясь в полемику по данному вопросу, следует отметить, что авторы данной статьи институты развития рассматривают как специализированные государственные организации, созданные для решения задач, необходимых для содействия развитию инновационной экономики, обеспечению устойчивого социального благополучия населения страны, которые не могут быть оптимально решены с использованием только государственных или только рыночных механизмов. Исходя из сложившейся практики, можно выделить три уровня их функционирования в зависимости от того, кто является инициатором их создания: федеральные институты развития, федеральные институты развития на региональном уровне или региональные институты развития.

Первые институты развития появились еще в 1990-е гг. В 1997 г. по решению Правительства Российской Федерации было создано Агентство по ипотечному жилищному кредитованию, основной задачей которого являлось формирование и развитие ипотечного рынка в России. В последующем 2001 г. с целью модернизации российского АПК был создан «Росагролизинг». В последующие годы были созданы Инвестиционный фонд РФ (2005), Российская венчурная компания (2006), Внешэкономбанк (2007), Российская корпорация нанотехнологий (2007). К уже названным можно добавить Фонд развития инновационного центра «Сколково», ГК «Фонд содействия реформированию ЖКХ», Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере, Российский фонд технологического развития и др. Наряду с федеральными институтами развития довольно активно функционируют федеральные институты развития на региональном уровне. К ним, в первую очередь, относятся региональные ипотечные фонды, которые, по сути, являются региональными отделениями федерального «Агентства по ипотечному жилищному кредитованию» (АИЖК), региональные венчурные фонды, которые, по существу, также являются местными отделениями федерального ОАО «Российская венчурная компания». К настоящему времени в России сформирована разветвленная сеть региональных венчурных фондов, созданных Минэкономразвития РФ совместно с администрациями регионов.

С начала 2000-х гг. по инициативе региональных и местных властей стали создаваться «чисто» региональные институты. В 2006 г. было создано ОАО «Корпорация Развития», которое ранее именовалось «Корпорация «Урал промышленный – Урал Полярный» и было ориентировано на содействие развитию и реализации проекта «Урал промышленный – Урал полярный» [8]. Однако в последующие годы ОАО «Корпорация Развития» значительно расширила свою деятельность в части разработки проектов, способствующих развитию всего Уральского федерального округа и привлечения инвесторов для их реализации. Координацию деятельности корпорации осуществляет Наблюдательный совет, в состав которого входят представители администраций субъектов УрФО.

С 2010 г. в Свердловской области функционирует «Корпорация развития Среднего Урала», основным назначением которой является формирование благоприятной инвестиционной среды на территории региона, создание лучших условий для инвестирования в объекты промышленности, социальной, транспортной и жилищно-коммунальной инфраструктуры. С 2011 г. в Челябинской области действует ОАО «Агентство регионального развития», ключевые задачи которого заключаются в повышении инвестиционной привлекательности Челябинской области; обеспечении режима «одного окна» для инвесторов при взаимодействии с органами исполнительной власти. Созданы корпорации в целом ряде других регионов России: Пензенской, Ростовской, Волгоградской, Ульяновской, Самарской, Ярославской, Оренбургской, Белгородской, Тульской областях, Карелии, Чувашии и др. По состоянию на начало 2016 г. в России зареги-

стрировано 42 корпорации развития [9]. Одной из наиболее распространенных структур среди собственно региональных институтов развития являются фонды поддержки малого и среднего бизнеса, в которых аккумулируются средства регионов и федерального бюджета, выделяемые на субсидирование малого и среднего предпринимательства с целью стимулирования активной региональной политики в этой сфере.

Перспективным механизмом решения задач инновационного развития является государственно-частное и муниципально-частное партнерство (далее – ГЧП). Многие теоретические аспекты, причины возникновения, стимулы и проблемы развития, а также отличия ГЧП от прочих форм сотрудничества власти и бизнеса были рассмотрены авторами ранее [10]. Важным этапом в формировании этого института стало принятие в 2015 г. федерального закона о ГЧП (далее – Закон о ГЧП)[1]. В соответствии с данным законом под ГЧП понимается юридически оформленное на определенный срок и основанное на объединении ресурсов, распределении рисков сотрудничество публичного партнера, с одной стороны, и частного партнера, с другой стороны, которое осуществляется на основании соглашения о государственно-частном партнерстве, соглашения о муниципально-частном партнерстве, заключенных в соответствии с настоящим Федеральным законом в целях привлечения в экономику частных инвестиций, обеспечения органами государственной власти и органами местного самоуправления доступности товаров, работ, услуг и повышения их качества. Данный документ оказал значительное положительное влияние в плане унификации понимания ГЧП, поскольку до его принятия было предложено большое число разнообразных подходов и формулировок определения ГЧП.

Государственно-частное партнерство нацелено на привлечение частных ресурсов в так называемые некоммерческие (социально значимые) инвестиционные проекты. Особенностью таких проектов является низкая или отрицательная финансовая эффективность. При этом они направлены на производство благ, генерирующих значительные положительные внешние эффекты (экстерналии), что обуславливает необходимость их финансирования из бюджетов разных уровней. Такое сочетание эффектов от реализации проекта (отрицательная коммерческая эффективность и положительная общественная), а также необходимость привлечения частных инвесторов, нацеленных в первую очередь на получение положительного финансового результата, является одной из ключевых особенностей ГЧП, отличающих его от прочих форм сотрудничества государства и бизнеса, в частности от концессий, хотя многие исследователи, проводя анализ рынка ГЧП проектов, относят к данной сфере и концессии [11]. По мнению авторов, концессионная форма реализации и государственно-частное партнерство имеют принципиально важное отличие. Концессии изначально задумывались для реализации проектов, способных генерировать положительный денежный поток и в итоге окупить вложенные средства и обеспечить частному инвестору требуемую доходность. Кроме того, объект концессии должен обеспечить и возможность выплаты концеденту определенного концессионного платежа за право реализации этого проекта. При этом государство может фактически не принимать участия в реализации проекта, а лишь наблюдать за законностью работы концессионера. В случае ГЧП инвестор привлекается для реализации проектов, не предполагающих коммерческой эффективности. Следовательно, государство должно возмещать часть расходов инвесторов. На наш взгляд, данное отличие является принципиальным и позволяет рассматривать концессию и государственно-частное партнерство как две различные формы реализации инвестиционных проектов.

В условиях старопромышленных территорий, где накоплено огромное количество промышленных отходов (техногенных минеральных образований), вопрос обращения к институтам развития и механизмам ГЧП приобретает особую значимость. Общемировая практика показывает, что высокий удельный вес затрат на геологическое изучение техногенных месторождений и совершенствование технологий переработки техногенного минерального сырья не могут обеспечить рентабельность разработки последних. Высокая капиталоемкость и большой срок возврата инвестиций делают непривлекательными подобные инвестиционные проекты, хотя сырьевая база техногенных минеральных образований могла бы стать основой для развития малого предпринимательства при наличии необходимой поддержки, обеспечиваемой институтами развития при одновременном решении проблемы улучшения экологической ситуации территории [12, 13]. Общеизвестен положительный опыт привлечения институтов развития и механизмов ГЧП для создания технологий добычи и переработки техногенного минерального сырья в зарубежных странах. В сырьевом балансе США и Японии доля отходов составляет до 26 %, у большинства стран с развитой экономикой – от 16 до 20 % [14]. Подобный опыт решения проблемы был в свое время в Свердловской области, когда в 1996 г. здесь действовала областная целевая программа «Переработка техногенных образований Свердловской области». В современных условиях техногенные минеральные образования привлекают к себе все большее внимание в связи с постепенным истощением первичных месторождений, что еще более обостряет проблему использования возможностей институтов развития и ГЧП для создания инновационных технологий и иных форм поддержки инвестиционных проектов по освоению последних.

Несмотря на большую проделанную работу, следует отметить, что формирование институтов развития в России не опиралось на какую-то целостную концепцию как систему с общей стратегией и механизмом координации действий, что, безусловно, негативно сказывается на эффективности их использования в качестве инструмента привлечения инвестиционных ресурсов на развитие территорий. Анализ показал, что многие проблемы носят системный характер. К ним относятся следующие:

1. Практически не определен и не закреплен статус институтов развития как особой разновидности хозяйствующих субъектов со специфическим набором функций, полномочий и обязательств, что в итоге не позволяет адекватно оценивать и контролировать эффективность их функционирования.

2. Неопределенность правового статуса привела к неоправданно большому количеству организационно-правовых форм институтов развития. Согласно результатам исследования, выполненного специалистами Корпорации развития

[1]О государственно-частном, муниципально-частном партнерстве в Российской Федерации и внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации: федер. закон от 13.07.2015 № 224-ФЗ. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_182660

Среднего Урала, региональные институты развития в форме открытых акционерных обществ составляют 72 % от их общего количества, государственные бюджетные учреждения – 14 %, структуры в составе исполнительных органов государственной власти – 10 % и акционерные некоммерческие организации – около 4 %[6–7].

Разнообразие созданных институтов развития свидетельствует скорее не об объективных причинах и особенностях экономического развития различных регионов, а о необходимости унификации их правового положения, установления общих принципов деятельности, разработки нормативно-методической базы их функционирования.

3. Отсутствует правовой режим ответственности институтов развития за результаты неэффективной деятельности, которые должны использоваться в качестве основания для его ликвидации или как минимум прекращения бюджетного финансирования [15].

Несмотря на то что практически не вызывает сомнения тот факт, что подготовить оптимальную программу действий по государственной поддержке тех видов институтов, которые способны дать новый импульс для развития экономики, возможно только на основе комплексного анализа и оценки эффективности функционирования действующих институтов развития, до настоящего времени оценка результативности и эффективности деятельности российских институтов развития не только не внедрена в практику государственного регулирования, но и не нашла убедительного теоретического решения. В нормативно-правовых актах и корпоративных документах (положения, стратегии, методические разработки) практически не определены ни критерии оценки эффективности институтов развития, ни алгоритм их применения.

***Методические подходы к оценке эффективности институтов развития.*** В самом общем виде эффективность любого процесса понимается как соизмерение полученных результатов с необходимыми для его реализации затратами. Согласно предназначению институтов развития, результативность их деятельности должна оцениваться с учетом воздействия реализуемых ими инвестиционных проектов на социально-экономическое развитие страны и ее регионов. Более того, большинство российских институтов развития создано государством в интересах обеспечения его социально-экономического развития за счет бюджетных средств и иного государственного имущества. Соответственно в основу комплексной, системной оценки эффективности деятельности институтов развития должен быть положен государственный подход, учитывающий государственные интересы. В связи с этим оценивать результаты деятельности институтов развития следует через изменение параметров экономического роста или социального развития территориальных систем, напрямую зависящее от эффективности конкретных инвестиционных проектов, реализуемых с их участием. Вместе с тем большинство из созданных институтов развития являются хозяйствующими субъектами (организациями) осуществляющими собственную деятельность в соответствии со спецификой и целями их образования. Согласно этим двум аспектам деятельности институтов развития, их эффективность, по мнению авторов, также должна определяться с учетом видов их функционирования:

1. Оценки экономических показателей их собственной деятельности институтов развития как особого вида хозяйствующих субъектов (организаций) с учетом их предназначения и специфики деятельности.

2. Определения вклада институтов развития в экономический рост, т. е. оценки влияния деятельности институтов развития на изменение национальных и региональных показателей экономического развития, напрямую зависящее от эффективности конкретных инвестиционных проектов, реализуемых с их участием.

***Оценка эффективности институтов развития как хозяйствующих субъектов,*** с одной стороны, должна отражать их способность и готовность к решению стоящих перед ними задач, с другой – давать представление об их экономичности и доходности. К разряду критериев оценки могут быть отнесены: исполнение бюджетов институтов развития в соответствии с плановыми значениями, использование эффективных механизмов, наличие документов, определяющих стратегию и перспективы их развития и др. Для оценки эффективности институтов развития как хозяйствующих субъектов важное значение имеют такие экономические показатели деятельности, как экономичность, оптимальное соотношение между расходами на собственное содержание института развития и объемом полученных бюджетных и приравненных к ним средств для управления и выполнения институтом развития своих функций [6, 7]; соотношение темпов роста доходов институтов развития и расходов на их содержание; отношение доли расходов на институты развития к ВВП.

***Оценка влияния институтов развития на экономический рост исходя из эффективности реализации инвестиционных проектов.***

В общем случае при реализации инвестиционных проектов решения принимаются на основе сопоставления затрат и выгод независимо от того, где они возникают – в частном или общественном секторе. Потребность в особых подходах возникает в ситуациях, при которых не все генерируемые проектом эффекты в полной мере оцениваются рынком. Если искажений рынка не наблюдается или они сведены к минимуму, применяются традиционные методы оценки проектов в частном секторе, где эффективность определяется на основе сопоставления предполагаемой прибыли и затрат с учетом дисконтирования.

В отличие от частного сектора, где решения определяются исходя из выгод конкретных инвесторов, рассчитанных в условиях наблюдаемой рыночной действительности, в общественном секторе решения должны приниматься в интересах всего общества, с учетом всех фактически возникающих эффектов. Среди западных экономистов наиболее известны внесшие существенный вклад в развитие теории и методологии оценки эффективности использования общественных (государственных) финансов Р. Масгрэйв и Дж. Стиглиц. В России данный подход еще не получил достаточного практического применения. Однако можно выделить ряд теоретико-методологических работ, в частности монографии Т. С. Новиковой и А. Б. Когана. Ряд эффектов, генерируемых в ходе реализации проекта, учитывается, но за институциональными рамками проекта (т. е. выгоды получают субъекты, не участвующие в реализации проекта). Органы власти также вынуждены корректировать рыночные цены, ставки заработной платы и процента в попытке отразить предпочтения общества и альтернативные издержки.

При оценке эффективности проектов в общественном секторе на первом месте стоит проблема выявления и оценки всех реальных результатов проекта. Для этой цели в мировой практике были разработаны различные методологические подходы. Среди основных можно выделить следующие:

– анализ издержек и выгод (cost-benefitanalysis – CBA); подход предполагает определение для каждого рассматриваемого проекта соотношения понесенных издержек и выгод, которые должны быть измерены и выражены в денежных единицах; в результате появляется возможность ранжирования проектов; теоретико-методологические основы данного метода, заложенные еще в 1950–1960-х гг., продолжают совершенствоваться [16]. В настоящее время данный подход используется для анализа широкого круга практических задач – от оценки эффективности инвестиционных проектов в реальном секторе экономики [17] до анализа «выгод» организаторов террористических актов [18]. В России данный метод не получил широкого применения, однако он был успешно применен для анализа эффективности использования государственных средств при подготовке к проведению зимней олимпиады в Сочи в 2014 г. [19];

– анализ издержек и результативности (cost-effectivenessanalysis – CEA); в качестве выгод от реализации проекта рассматривается полученный какой-либо группой населения социальный эффект, при этом в отличие от метода «издержки-выгоды» оценка производится не в денежных, а в конечных общественных результатах; данный метод получил широкое применение при анализе эффективности различных программ социальной направленности, в частности в медицине [20] и образовании [21].

– анализ издержек и полезности (cost-utilityanalysis – CUA). Оценка полезности проводится на основе комплексного показателя, полученного в результате анкетирования стейкхолдеров реализуемого проекта, которые должны дать количественную оценку желательности предполагаемого результата;

– анализ «цена–качество» (valueformoney – VfM). Разрабатываются стандарты качества блага. Все варианты реализации проекта оцениваются с точки зрения предложенных показателей и сводятся в интегральный показатель качества, который соотносится со стоимостью реализации проекта. Данный подход получил широкое распространение в последние 25 лет в связи с расширением практики привлечения ресурсов частных компаний к выполнению государственных функций в рамках соглашений о ГЧП. В частности, проводится анализ эффективности реализации ГЧП проектов в секторе медицинских услуг [22], а также сфере строительства платных автомобильных дорог [23, 24].

В каждом из методов исследователи представляют различные целевые функции, однако общей и актуальной задачей является оценка максимально полных экономических эффектов, включая мультипликативные эффекты, под которыми понимается комплексное влияние, оказываемое проектом на экономическую систему по всей цепи межотраслевых связей. Для оценки мультипликативных экономических эффектов широко используются различные математические модели экономических систем. При этом наибольшее развитие и распространение получили модели, основанные на балансовом принципе и построенные с использованием методологии «затраты-выпуск» и системы национальных счетов. Данный тип моделей позволяет учитывать структурные особенности экономических систем в процессе формирования и распространения мультипликативных эффектов. Более подробно вопросы оценки эффективности общественно значимых инвестиционных проектов с учетом мультипликативных эффектов рассмотрены в других работах авторов данной статьи [9].

## Методика оценки экономической эффективности инвестиционных проектов, реализуемых при финансовой поддержке государства

Оценка эффективности проекта для частного инвестора проводится на основе стандартных финансовых показателей: чистый дисконтированный доход (ЧДД), внутренняя норма доходности (ВНД), индексы доходности, срок окупаемости. Поскольку при принятии решения об участии в проекте частный инвестор рассматривает все доступные на рынке варианты, необходимо, чтобы показатели финансовой эффективности проекта были приемлемыми в сравнении с другими вариантами вложения ресурсов. Первым показателем, рассчитываемым при оценке эффективности для частного инвестора, является ЧДД: эффективность проекта для государства определяется в соответствии с его чистым дисконтированным доходом. Но в отличие от распространенного подхода в состав налоговых доходов кроме прямых (непосредственно связанных с реализацией проекта, рассчитываемых стандартным образом на основе бизнес-плана проекта и прогнозируемых финансовых показателей) включаются мультипликативные налоговые поступления. Источником этих доходов выступает оживление в смежных секторах, возникающее на стадии строительства и эксплуатации объекта. Таким образом, ЧДД от реализации проекта для государства определяется по следующей формуле:

$$\text{ЧДД}_{\text{гос}} \sum_{m=1}^{m} \left(-\text{Cost}_m + \text{Rev}_m + \text{Tax}_{\text{прям}} + \text{Tax}_{\text{мульт}}\right) \alpha_m,$$

где $\text{Cost}_m$ – бюджетные расходы по проекту на m шаге; $\text{Rev}_m$ – доход на шаге $m$; $\text{Tax}_{\text{прям}}$ – прямые налоговые поступления от проекта; $\text{Tax}_{\text{мульт}}$ – косвенные налоговые поступления, возникающие в результате активизации экономической активности на территории в смежных отраслях и потребительском рынке; $\alpha_m$ – коэффициент дисконтирования.

Мультипликативные налоговые доходы (МНД) складываются из двух источников:

– МНД на стадии инвестирования ($t_1$);

– МНД от эксплуатационных расходов ($t_2$).

Для расчета мультипликативных налоговых поступлений используются коэффициенты мультипликатора:

$$\text{Tax}_{\text{мульт}} = T_1 + T_2,$$

где $T_1$ – мультипликативный налоговый эффект на стадии реализации; $T_2$– мультипликативный налоговый эффект на стадии эксплуатации; $T_1 = \sum_{i=1}^{K} L_i \alpha_i, T_2 = \sum_{i=1}^{K} S_i \alpha_i$; $L_i$ – спрос на продукцию (услуги) сектора $i$, генерируемый в ходе реализа-

ции (разработки, строительства) проекта; $S_i$ – спрос на продукцию (услуги) сектора *i*, генерируемый проектом на стадии эксплуатации; $\alpha_i$ – налоговый мультипликатор вида деятельности *i*; *K* – количество задействованных видов экономической деятельности.

Данная методика предполагает оценку эффективности проекта для двух экономических субъектов, участвующих в проекте (государства и частной компании). Однако на практике при реализации проектов со стороны органов власти (одного или разных уровней) и/или бизнеса участвуют несколько субъектов. Важной особенностью таких проектов с точки зрения организации, оценки экономической эффективности и распределения выгод и затрат является их полисубъектность. Полисубъектность проекта заключается в том, что его финансирование будет осуществляться из нескольких государственных и минимум одного частного источника. Таким образом, возникает необходимость в обосновании доли финансирования из каждого источника. Очевидно, что затраты на реализацию должны разделяться в соответствии с ожидаемыми выгодами для территории, в том числе налоговыми. Возникает вопрос относительно региона регистрации основной компании-оператора проекта, поскольку основную долю бюджетных доходов от реализации проекта получит регион, в котором будет зарегистрирована компания-оператор. С точки зрения возникновения косвенных (мультипликативных) экономических эффектов, важное значение имеет выбор подрядчиков для выполнения необходимых работ и поставки оборудования на всех стадиях проекта.

Проведенное исследование позволило авторам сделать ряд выводов.

1. Институты развития, являясь инструментом государственной политики по стимулированию инновационных процессов и развитию инновационной инфраструктуры, способны содействовать модернизации отраслей экономики, созданию эффективной инновационной экономики.

2. Несмотря на принимаемые меры как на федеральном, так и на региональном уровнях, процесс формирования институтов развития нельзя считать завершенным, еще предстоит создание целостной системы подобных институтов в рамках существующих уровней государственной и муниципальной власти.

3. В существенной доработке нуждается методология системного анализа и комплексной оценки эффективности деятельности российских институтов развития. Без изучения вопроса о результативности функционирования невозможно ни формирование новых институтов развития, ни внесение корректив в механизмы деятельности существующих, что, в свою очередь, обязывает ввести общие принципы и методы, обязательные для оценки эффективности деятельности институтов развития.

4. Оценка эффективности институтов развития должна осуществляться на основе учета мультипликативных эффектов от реализации инвестиционных проектов, позволяющих более полно оценивать результативность инвестиционных ресурсов.

*Статья подготовлена в соответствии с утвержденным Планом НИР Института экономики УрО РАН на 2019–2021 гг.*

ЛИТЕРАТУРА

1. Чернышев О., Калашникова Е. Развитие государственно-частного партнерства в России. URL: http://www.rusk.ru/st.php?idar=113838
2. О деятельности финансовых институтов развития // Материалы к заседанию Совета по конкурентоспособности и предпринимательству при Правительстве Российской Федерации. URL: http://pandia.ru/text/77/221/14772.php
3. Мельников Р. М. Результативность и эффективность российских финансовых институтов развития: подходы к оценке и пути повышения // Финансы и кредит. 2012. № 21(501). С. 2–10.
4. Кармышев Ю. А. Системные проблемы функционирования и взаимодействия институтов диверсификации и инновационного развития в формирующейся национальной инновационной системе России // Вестник Тамбовского университета. Сер. «Гуманитарные науки». 2012. № 8. С. 48–58. https://elibrary.ru/item.asp?id=17909478
5. Грозова О. С. К вопросу о классификации институтов развития и институциональных рисков инновационной деятельности // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 4. С. 200–210. https://elibrary.ru/item.asp?id=17883032
6. Региональные институты развития субъектов РФ. Обзорно-аналитическое исследование // Материалы к I Всерос. форуму институтов развития. Екатеринбург: Корпорация развития Среднего Урала. 2013.
7. Региональные институты развития: в борьбе за инвестиционную привлекательность. Обзорно-аналитическое исследование // Материалы к II Всерос. форуму институтов развития. Екатеринбург: Корпорация развития Среднего Урала, 2015. Ч. 2.
8. Коротеев В. А., Иванов К. С., Вахрушева Н. В. Мегапроект «Урал промышленный – Урал Полярный». Современное состояние // Пути реализации нефтегазового и рудного потенциала ХМАО – Югры: сб. статей. Ханты-Мансийск: Наука–Сервис, 2011. С. 95–104.
9. Татаркин Д. А., Сидорова Е. Н., Трынов А. В. Оптимизация управления финансовыми потоками на основе моделирования региональных мультипликативных эффектов // Экономика региона. 2015. № 4. С. 323–335. https://doi.org/10.17059/2015-4-25
10. Сидорова Е. Н., Татаркин Д. А. Государственно-частное партнерство: роль, проблемы, возможности. Екатеринбург: Ин-т экономики УрО РАН, 2011. 228 с.
11. Савруков А. Н., Савруков Н. Т., Козловская Э. А. Оценка состояния и уровня развития проектов государственно-частного партнерства в субъектах РФ // Вопросы экономики. 2018. № 7. С. 131–141. https://doi.org/10.32609/0042-8736-2018-7-131-141
12. Пахальчак Г. Ю. Роль партнерства государства и бизнеса в экономическом регулировании приоритетных экологических проблем // Дискуссия. 2014. № 8 (49). С. 74–80.
13. Надымов Д. С. Привлечение ресурсов институтов развития к реализации проектов по отработке техногенных минеральных объектов // Гуманитарные, социально-экономические и общественные науки. 2014. № 12. С. 109–111. https://elibrary.ru/item.asp?id=22857242
14. Михайлов Б. К. Техногенные минерально-сырьевые ресурсы / под ред. Б. К. Михайлова. М.: Научный мир. 2012. 231 с.
15. Оценка эффективности деятельности российских и зарубежных институтов развития / под ред. И. Н. Рыковой. М.: НИФИ, 2016. 204 с.
16. Voros T. Methodological challenges in cost-benefit analysis // Public finance quarterly. 2018. Vol. 63(3). P. 402–423.
17. Abelson P. Cost-benefit evaluation of mining projects // Australian economic review. 2015. Vol. 48 (4). P. 442–452. https://doi.org/10.1111/1467-8462.12132
18. Hausken K. A cost-benefit analysis of terrorist attacks // Defence and peas Economics. 2018. Vol. 29 (2). P. 111–129. https://doi.org/10.1080/10242694.2016.1158440
19. Пилипенко И. Использование анализа затраты-выгоды для оценки эффективности государственных инвестиционных проектов (на примере зимних Олимпийских игр-2014 в Сочи) // Вопросы экономики. 2011. № 11. С. 57–78.

20. Leal J., Manetti S., Buchanan J. The impact of hospital costing methods on cost-effectiveness analysis: a case study // PharmacoEconomics. 2018. Vol. 36 (10). P. 1263–1272. https://doi.org/10.1007/s40273-018-0673-y
21. Lapidus L., Kazakov V. A methodological basis for assessing the cost-effectiveness of corporate training // Problems of economic transition. 2017. Vol. 59(7/9). P. 600–607. https://doi.org/10.1080/10611991.2017.1394754
22. Ariste R., Di Matteo L. Value for money: an evaluation of health spending in Canada // International journal of health economics and management. 2017. Vol. 17 (3). P. 289–310. https://doi.org/10.1007/s10754-016-9204-6
23. Opara M. Value for money and risk relationships in public-private partnerships: evaluating program-based evidence // Australian accounting review. 2018. Vol. 28(3). P. 391–404. https://doi.org/10.1111/auar.12194
24. Kweun J. Y., Wheeler P. K., Gifford J. L. Evaluating highway public-private partnerships: evidence from U.S. value for money studies // Transport policy. 2018. Vol. 62(C). P. 12–20. https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2017.03.010

*Статья поступила в редакцию 24 декабря 2018 г.*

УДК 330.341.2(1):330.35 https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-1-162-170

# The role of development institutions in building up investment resources of old industrial territories

**Elena Nikolaevna SIDOROVA***,
**Aleksandr Valer'evich TRYNOV****

Institute of Economics of the Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russia

This paper is devoted to the study of problems of building up the investment potential of old industrial territories as a necessary condition for transition of the Russian economy to an innovative development path. ***The relevance of the work*** is due to the lack of investment resources in the public sector sufficient to solve the tasks. A hypothesis has been formulated and confirmed about the fact that one of the main ways of ensuring the innovative development of the Russian economy, its industries, subjects and municipalities is the combination of state and business financial resources. As an instrument for solving this task, the paper considers creation of specialized organizations with state participation – development institutions and the use of public-private partnership (PPP) mechanisms.

***The purpose of the paper*** is to clarify the role of development institutions in building up the innovation potential of territories, including those belonging to the old industrial ones, creating conditions for building infrastructure that provides access for venture companies to necessary resources, primarily financial ones, and using PPP mechanisms in their activity.

***Results.*** Some theoretical foundations are cleared up and a classification of development institutions is given; the analysis of the current state of formation and functioning of development institutions in Russia is carried out. The author's approach to evaluating the effectiveness of their functioning is proposed. Much attention is paid to the development and expansion of opportunity for using development institutions for the purpose of implementation of projects to develop technogenic deposits. As a thesis of scientific and practical importance, the opinion is substantiated that the evaluation of effectiveness of investment projects should be carried out with consideration of multiplicative effects as a result of their implementation. The results of the study are obtained based on methods of comparative analysis and comparison of the accumulated experience in various regions of Russia.

The study allowed the authors to draw several conclusions that development institutions and PPP mechanisms are a promising way to solve the problems of innovative development of the economy and can be effectively used to substantiate the prospects for the development of mineral resources of raw materials areas and the development of technogenic deposits of old industrial regions.

*Keywords:* development institutions, public-private partnership, subsoil development, performance evaluation, performance criteria, multiplicative effect.

## REFERENCES

1. Chernyshev O., Kalashnikova E. *Razvitiye gosudarstvenno-chastnogo partnerstva v Rossii*. URL: http://www.rusk.ru/st.php?idar=113838
2. *O deyatel'nosti finansovykh institutov razvitiya* [About activities of financial development institutions]. Proceeding for the meeting of the Council on Competitiveness and Entrepreneurship under the Government of the Russian Federation. URL: http://pandia.ru/text/77/221/14772.php
3. Mel'nikov R. M. 2012, *Rezul'tativnost' i effektivnost' rossiyskikh finansovykh institutov razvitiya: podkhody k otsenke i puti povysheniya* [Efficiency and effectiveness of Russian financial development institutions: estimation approaches and ways to increase]. *Finansy i kredit* [Finance and Credit], no. 21(501), pp. 2–10.
4. Karmyshev Yu. A. 2012, System problems of functioning and interaction of diversification institutions and innovation development in the emerging national innovation system of Russia. *Vestnik Tambovskogo universiteta* [Journal "Tambov University Review. Series Humanities], no. 8, pp. 48–58. (*In Russ.)* https://elibrary.ru/item.asp?id=17909478
5. Grozova O. S. 2012, To the question of classification of development institutions and institutional risks of innovation. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education], no. 4, pp. 200–210. (*In Russ.)* https://elibrary.ru/item.asp?id=17883032
6. 2013, *Regional'nyye instituty razvitiya sub"yektov RF* [Regional development institutions of the subjects of the Russian Federation]. Analytic investigation and survey. Proceedings for I All-Russian Forum about Development Institutions. Ekaterinburg, Development Corporation of the Middle Urals.
7. 2015, *Regional'nyye instituty razvitiya: v bor'be za investitsionnuyu privlekatel'nost'* [Regional development institutions: in a bid for for investment attractiveness]. Analytic investigation and survey. Proceedings for II All-Russian Forum about Development Institutions. Ekaterinburg, Development Corporation of the Middle Urals. Part 2.
8. Koroteev V. A., Ivanov K. S., Vakhrusheva N. V. 2011, *Megaproyekt «Ural promyshlennyy – Ural Polyarnyy»* [Megaproject "Ural Industrial – Ural Polar"]. The current state. Ways to realize the oil, gas and ore potential of the Khanty-Mansi Autonomous Okrug – Ugra: collection of papers. Khanty-Mansiysk, pp. 95–104.
9. Tatarkin D. A., Sidorova E. N., Trynov A. V. 2015, Optimization of financial flows management based on modeling of regional multiplicative effects. *Ekonomika regiona* [Economy of the region], no. 4, pp. 323–335. (*In Russ.*) https://doi.org/10.17059/2015-4-25
10. Sidorova E. N., Tatarkin D. A. 2011, *Gosudarstvenno-chastnoye partnerstvo: rol', problemy, vozmozhnosti* [Public private partnership: role, problems, opportunities]. Ekaterinburg, 228 p.
11. Savrukov A. N., Savrukov N. T., Kozlovskaya E. A. 2018, Evaluation of the state and level of development of public-private partnership projects in the regions of the Russian Federation. *Voprosy Ekonomiki* [Voprosy Ekonomiki], no. 7, pp. 131–141. (*In Russ.)* https://doi.org/10.32609/0042-8736-2018-7-131-141
12. Pakhalchak G. Yu. 2014, The role of partnership between the state and business in economic regulation of priority environmental problems. *Diskussiya* [Discussion], No 8 (49), pp. 74–80. (*In Russ.)*
13. Nadymov D. S. 2014, Attraction of resources of development institutions to implementation of projects for the development of man-made mineral objects. *Gumanitarnyye, sotsial'no-ekonomicheskiye i obshchestvennyye nauki* [Humanities, social-economic and social sciences], no. 12, pp. 109–111. (*In Russ.*) https://elibrary.ru/item.asp?id=22857242
14. Mikhailov B. K. 2012, *Tekhnogennyye mineral'no-syr'yevyye resursy* [Man-made mineral resources], ed. by B. K. Mikhailov. Moscow, 231 p.
15. 2016, *Otsenka effektivnosti deyatel'nosti rossiyskikh i zarubezhnykh institutov razvitiya* [Evaluation of activities effectiveness of Russian and foreign development institutions], ed. by I. N. Rykova. Moscow, 204 p.
16. Voros T. 2018, Methodological challenges in cost-benefit analysis. *Public finance quarterly*, vol. 63(3), pp. 402–423.

* ✉ Katelen@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-6306-4074
**trynovv@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-2969-2536

17. Abelson P. 2015, Cost-benefit evaluation of mining projects. *Australian economic review*, vol. 48 (4), pp. 442–452. https://doi.org/10.1111/1467-8462.12132
18. Hausken K. 2018, A cost-benefit analysis of terrorist attacks. *Defence and peas Economics*, vol. 29 (2), pp. 111–129. https://doi.org/10.1080/10242694.2016.1158440
19. Pilipenko I. 2011, Using cost-benefit analysis to evaluate effectiveness of public investment projects (for example, the Winter Olympic Games in Sochi 2014). *Voprosy Ekonomiki* [Voprosy Ekonomiki], no.11, pp. 57–78. (*In Russ.*)
20. Leal J., Manetti S., Buchanan J. 2018, The impact of hospital costing methods on cost-effectiveness analysis: a case study. *PharmacoEconomics*, vol. 36 (10), pp. 1263–1272. https://doi.org/10.1007/s40273-018-0673-y
21. Lapidus L., Kazakov V. 2017, A methodological basis for assessing the cost-effectiveness of corporate training. *Problems of economic transition*, vol. 59(7/9), pp. 600–607. https://doi.org/10.1080/10611991.2017.1394754
22. Ariste R., Di Matteo L. 2017, Value for money: an evaluation of health spending in Canada. *International journal of health economics and management*, vol. 17 (3), pp. 289–310. https://doi.org/10.1007/s10754-016-9204-6
23. Opara M. 2018, Value for money and risk relationships in public-private partnerships: evaluating program-based evidence. *Australian accounting review*, vol. 28(3), pp. 391–404. https://doi.org/10.1111/auar.12194
24. Kweun J. Y., Wheeler P. K., Gifford J. L. 2018, Evaluating highway public-private partnerships: evidence from U. S. value for money studies. *Transport policy*, vol. 62(C), pp. 12–20. https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2017.03.010

## Acknowledgements

This paper was prepared in accordance with the approved Plan of research of the Institute of Economics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences for 2019–2021.

*The article was received on December 24, 2018*

# История горного дела

## Святослав Несторович Иванов (1911–2003) и святославит

**Юрий Викторович ЕРОХИН***,
**Кирилл Святославич ИВАНОВ****
*erokhin-yu@yandex.ru
**ivanovks55@ya.ru

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

**Yuriy Viktorovich EROKHIN***,
**Kirill Svyatoslavich IVANOV****
*erokhin-yu@yandex.ru
**ivanovks55@ya.ru

Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of the RAS

## Svyatoslav Nestorovich Ivanov (1911–2003) and Svyatoslavite

**Svyatoslav Nestorovich Ivanov was a famous Ural geologist, prominent scientist, expert in the field of geology of ore deposits, petrology, tectonics and the deep structure of the Earth's crust.**

***Keywords:*** **mineral, feldspar, Svyatoslavite, geologist, specialist in tectonics, S. N. Ivanov.**

**Святослав Несторович Иванов являлся известным уральским геологом, крупным ученым, специалистом в области геологии рудных месторождений, петрологии, тектоники и глубинного строения земной коры.**

***Ключевые слова:*** **минерал, полевой шпат, святославит, геолог, тектонист, С. Н. Иванов.**

Основные даты жизни и деятельности С. Н. Иванова [по 1].

**1911** – родился 16 февраля в г. Нижний Новгород.

**1928–1932** – студент Уральского геологоразведочного института (ныне УГГУ).

**1932–1933** – геолог Красноуральского медного комбината (г. Красноуральск).

**1933–1940** – рудничный и главный геолог в Дегтярском геологоразведочном управлении (г. Дегтярск).

**1940** – переведен на работу в Горно-геологический институт Уральского филиала АН СССР в г. Свердловске (ныне ИГГ УрО РАН) на должность старшего научного сотрудника.

**1943** – защитил кандидатскую диссертацию на тему «Дегтярское месторождение медных руд».

**1946** – избран заведующим горно-геологическим сектором в ГГИ УФАН СССР, награжден медалью «За доблестный труд в Великой Отечественной войне 1941–1945 гг.» (15.05.46 г.).

**1948** – защитил докторскую диссертацию на тему «Колчеданные месторождения Урала и их метаморфизм».

**1949** – за открытие и разведку Ново-Сибайского месторождения присуждена Государственная (Сталинская) премия СССР.

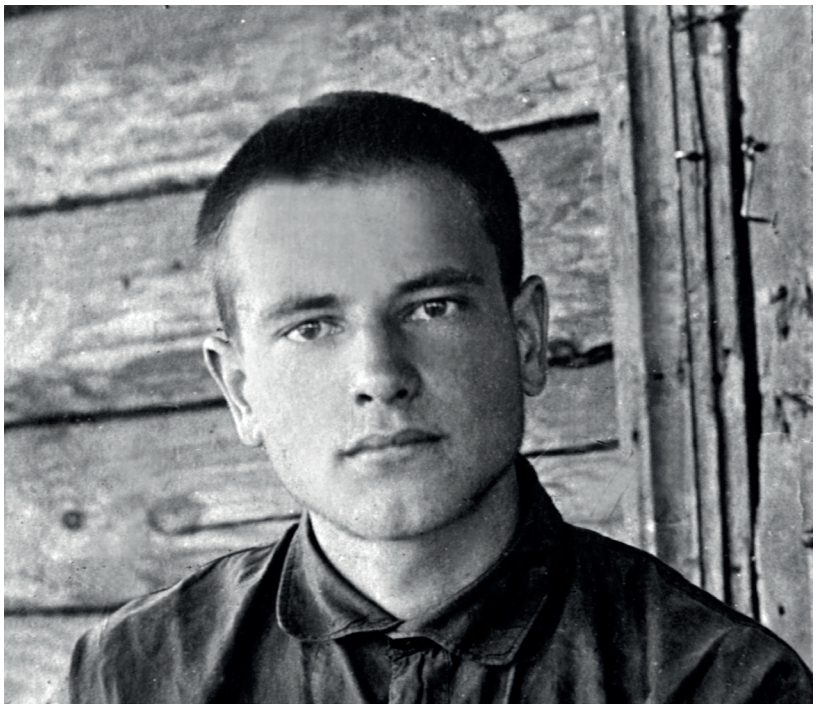
**1953** – избран заведующим лабораторией рудных месторождений и петрографии в ГГИ УФАН СССР.

**1954** – награжден орденом Трудового Красного Знамени (27.03.54 г.).

*Святослав Несторович Иванов (1911–2003). Фотоархив Президиума РАН, фото 1970 года*

[1]Продолжение серии статей проекта «Минералогия в лицах». См.: А. В. Шубников (1887–1970) и шубниковит (Изв. УГГУ, № 1(49), 2018. С. 140–146); В. П. Шуйский (1935–2000) и шуйскит (Изв. УГГУ, № 2(50), 2018. С. 157–161); Ю. С. Кобяшев (1935–2009) и кобяшевит (Изв. УГГУ, № 3(51), 2018. С. 165–175); Анатолий Филиппович Бушмакин (1947–1999) и бушмакинит (Изв. УГГУ, № 4(52), 2018. С. 152–157).

*Святослав со своими родителями, ориентировочно 1914 г. (здесь и далее фото из личного архива К. С. Иванова).*



*Святослав Несторович Иванов в период работы на Красноуральском медном комбинате.*

**1962** – назначен заведующим лабораторией эндогенной металлогении в Институте геологии УФАН СССР (ныне ИГГ УрО РАН).

**1966–1975** – директор Института геологии и геохимии УФАН СССР (ныне ИГГ УрО РАН).

**1970** – избран членом-корреспондентом Академии наук СССР (24.11.70 г.), награжден медалью «За доблестный труд в ознаменование 100-летия со дня рождения Владимира Ильича Ленина» (06.04.70 г.).

**1975** – награжден вторым орденом Трудового Красного Знамени (17.09.75 г.) и медалью «Тридцать лет Победы в Великой Отечественной войне 1941–1945 гг.» (08.05.75 г.).

**1978** – награжден медалью «Ветеран труда» (06.10.78 г.).

**1981** – награжден орденом Дружбы народов (10.02.81 г.).

**1985** – награжден медалью «Сорок лет Победы в Великой Отечественной войне 1941–1945 гг.» (08.05.85 г.).

**1986** – переведен на должность главного научного сотрудника в лабораторию метаморфизма в Институте геологии и геохимии УНЦ СССР (ныне ИГГ УрО РАН).

**2003** – умер 12 октября в возрасте 92 лет.

О Святославе Несторовиче написано много воспоминаний [1, 2 и др.], поэтому мы приведем только его биографию, без детального рассказа о его научных достижениях, которых было сделано очень много.

Родился Святослав Несторович 16 февраля 1911 г. в г. Нижний Новгород, в семье санитарного врача и учительницы. Его родители Нестор Иванович и Валентина Павловна были активными членами марксистских кружков, участвовали в создании рабочих революционных организаций, за что подвергались арестам, ссылкам и тюремному заключению. После Гражданской войны семья Ивановых с тремя детьми переехала в г. Свердловск. После окончания школы Святослав Несторович хотел стать физиком (на него произвел впечатление учебник физики А. И. Бачинского), но все же передумал и вслед за своим старшим братом в 1928 г. поступил на горный факультет Уральского политехнического института. В 1930 г. УПИ разделился на 10 разных институтов, и Святослав Несторович стал обучаться в Уральском геологоразведочном институте на кафедре поисков и разведки месторождений полезных ископаемых (под руководством А. П. Смолина). 5 июня 1932 г. институту вернули старое название [3], т. е. С. Н. Иванов закончил обучение уже в Уральском горном институте и получил специальность инженера по разведке цветных металлов.

Будучи студентом старших курсов, Святослав Несторович успел поработать на россыпях в районе р. Вишеры, а также преподавал («вечерникам» из рабочего факультета и студентам младших курсов) дисциплины «Общая геология» и «Геология рудных месторождений».

В 1932–1933 гг. Святослав Несторович сразу после института стал геологом Красноуральского медного комбината (Свердловская область). На следующий год он перебрался на работу в Дегтярское геологоразведочное управление, где проработал с 1933 по 1940 г. сначала рудничным, а потом и главным геологом. Благодаря активной работе Святослава Несторовича была проведена разведка Дегтярского медноколчеданного месторождения, которая показала наличие на этом объекте богатых по запасам медных руд, самых значительных на Среднем Урале. Вскоре у него родился первенец, Нестор Святославич Иванов (1937–2013), замечательный геофизик, автор многочисленных изобретений. В этом же году он в соавторстве с М. И. Меркуловым опубликовал книгу о геологическом строении и минерагении Дег-

*Святослав Несторович Иванов в рядах добровольцев ВОВ (внизу слева), 1941 г.*

тярского месторождения (на данный момент это единственная детальная работа об этом уже заброшенном объекте). Попутно Святослав Несторович сделал изобретение в области бурения. Им была радикально усовершенствована установка ударного бурения – при поднятии снаряд по наклонным пазам каждый раз поворачивался примерно на 15°, что обеспечивало более правильное нанесение удара, в результате резко увеличилась производительность ударного бурения.

В 1940 г. С. Н. Иванов как опытный производственник с ярко выраженной наклонностью к научным исследованиям был переведен в Горно-геологический институт УФАН СССР на должность старшего научного сотрудника. Однако научное обобщение материалов в спокойной академической обстановке продолжалось очень недолго. Начавшаяся Великая Отечественная война срочно потребовала больших усилий по обеспечению промышленности новыми источниками горнорудного сырья. По решению Академии наук С. Н. Иванов был прикомандирован к Сибайской геологоразведочной партии и возглавил разведку Сибайского медноколчеданного месторождения. Но Святослав Несторович ушел добровольцем на фронт. Он был пехотинцем, и шансов выжить на войне у него было мало. Но фронту нужна

*Святослав Несторович Иванов – заведующий лабораторией и директор ИГ УФАН СССР, начало 1960-х гг.*

АКАДЕМИЯ НАУК
Союза Советских Социалистических Республик

ЧЛЕН-КОРРЕСПОНДЕНТ
АКАДЕМИИ НАУК СССР

Святослав Несторович
ИВАНОВ

Президент Академии наук СССР академик

№ 813

Избран 24 ноября 1970 г.

*Удостоверение чл.-корр. АН СССР Святослава Несторовича Иванова.*

*Святослав Несторович Иванов – главный научный сотрудник в ИГГ УрО РАН. Фото из архива ИГГ, начало 1990-х гг.*

была медь, поэтому одного из лучших специалистов по поиску и разведке колчеданных месторождений вернули в г. Сибай. Вероятно, это было правильным решением, так как под руководством С. Н. Иванова были выявлены и немедленно стали отрабатываться крупные запасы очень богатых медных руд. В 1941 г. в его семье родилась дочь Марианна Святославна Иванова (1941–2005), будущий инженер-литейщик.

В напряженное военное время Святослав Несторович не прекращал научной деятельности, о чем свидетельствует защищенная им в 1943 г. по рекомендации академика А. Е. Ферсмана кандидатская диссертация по досконально изученному им Дегтярскому месторождению. В 1948 г. С. Н. Ивановым была успешно (хотя защита и проходила с боль-

шим противодействием некоторых организаций и специалистов) защищена докторская диссертация по колчеданным месторождениям Урала. К этому времени он уже снова работал в Горно-геологическом институте УФАН СССР (в 1946 г. был избран заведующим сектором ГГИ УФАН СССР) и считался одним из ведущих специалистов нашей страны в области колчеданного рудообразования.

В 1949 г. Святослав Несторович за открытие и разведку Ново-Сибайского месторождения получил Государственную (Сталинскую) премию СССР (а позже его выбрали Почетным гражданином г. Сибая). В 1953 г. его избрали заведующим лабораторией рудных месторождений и петрографии в ГГИ УФАН СССР, а годом позже вручили орден Трудового Красного Знамени. В 1955 г. у него родился еще один сын Кирилл Святославич Иванов, в будущем тоже геолог. В 1962 г. С. Н. Иванов был назначен заведующим лабораторией эндогенной металлогении в Институте геологии УФАН СССР.

В 1966–1975 гг. Святослав Несторович был директором Института геологии и геохимии УНЦ АН СССР. Несмотря на загруженность административными делами он продолжал плодотворно заниматься наукой. В 1970 г. его избрали членом-корреспондентом АН СССР. Важным шагом С. Н. Иванова на посту директора ИГГ УНЦ АН СССР стало назначение на должности исполняющих обязанности заведующих лабораториями перспективных молодых ученых (В. Н. Пучкова, Г. Б. Ферштатера, А. А. Краснобаева, А. А. Ефимова и др.), которые долгое время представляли, а некоторые и сейчас представляют, «лицо» института. Святослав Несторович, как передовой ученый, с 1950-х гг. успешно развивал на материалах Урала мобилизм, современную парадигму тектоники литосферных плит (и даже был сначала подвергнут за это так называемому аутодафе – публичному клеймению как якобы разносчик враждебной идеологии; по всей видимости, лишь наличие у С. Н. Иванова на тот момент Сталинской премии спасло его от куда более серьезных последствий). На посту директора он даже пытался сделать изучение тектоники плит обязательным (вроде еще одного кандидатского экзамена), но столкнулся с недовольством научного коллектива и, как следствие этого, обилием анонимок и жалоб в партийные органы. Устав бороться с отрицанием очевидного, Святослав Несторович написал заявление об уходе с поста директора по собственному желанию и стал заниматься наукой.

Святослав Несторович был действительным членом Всесоюзного минералогического общества и в период 1972–1975 гг. (возможно, и дольше) возглавлял Метеоритную комиссию при Уральском отделении ВМО.

В 1976 г. при активном участии и под научным руководством Святослава Несторовича (и академика А. В. Пейве) вышла новая «Тектоническая карта Урала масштаба 1:1 000 000», впервые в мире построенная на принципах новой глобальной тектоники, фундаментальный научный труд, который сразу вызвал последователей (и подражателей, в том числе в Северной Америке) и по сей день имеет научное значение. В 1986 г. С. Н. Иванова перевели на должность главного научного сотрудника в лабораторию метаморфизма в Институте геологии и геохимии УНЦ СССР, где он и работал вплоть до своей кончины. Умер Святослав Несторович 12 октября 2003 г. на 93 году жизни. Уже посмертно 16 февраля 2004 г. С. Н. Иванову (в составе большого коллектива коллег) присудили Премию Правительства РФ за «Создание научных основ развития рудной минерально-сырьевой базы Урала».

Святослав Несторович прожил яркую, полноценную и долгую жизнь и, по его словам, вполне счастливую, целиком отданную науке и обществу. Он подготовил 22 кандидата и трех докторов наук, многие из которых также сказали свое весомое слово в науке. Святослав Несторович избирался депутатом в горсоветы г. Ревды (1935–1937 гг.) и г. Свердловска (1947–1950 гг.). Воспитал двух сыновей и дочь, которые подарили ему шестерых внуков. В честь С. Н. Иванова в 1989 г. назвали новый минерал – святославит.

Святославит – моноклинный псевдоромбический аналог анортита, найденный впервые в горелых отвалах Челябинского угольного бассейна, расположенного на Южном Урале [4, 5]. Предполагалось, что этот минерал будет часто встречаться в углистых хондритах и других космических телах, а также на контактах магматических тел с углеродистыми породами, в шлаках и т. д., но уже по истечении 30 лет святославит пока нигде больше не найден. Возможно, это связано с тем, что сейчас большинство минералогических описаний базируется на определении минерала по данным микрозондового состава и рентгеновское изучение практически не применяется. К сожалению, химический состав святославита полностью идентичен анортиту, поэтому многие исследователи априори определяют минерал как анортит. Тем более что рентгеновское изучение минералов в породе всегда связано с определенными ограничениями и затруднениями. Вполне вероятно, что святославит встречается гораздо чаще, чем это принято считать. Ниже приведено его краткое описание на основании работ Б. В. Чеснокова и С. В. Кривовичева с коллегами [4, 5].

Святославит в виде мелких (до 0,5–0,8 мм) бесцветных кристаллов нарастает на стенки трещин в кусках древесного угля из «черных блоков». «Черные блоки» – это не прогоревшие участки внутри угольного отвала, резко выделя-

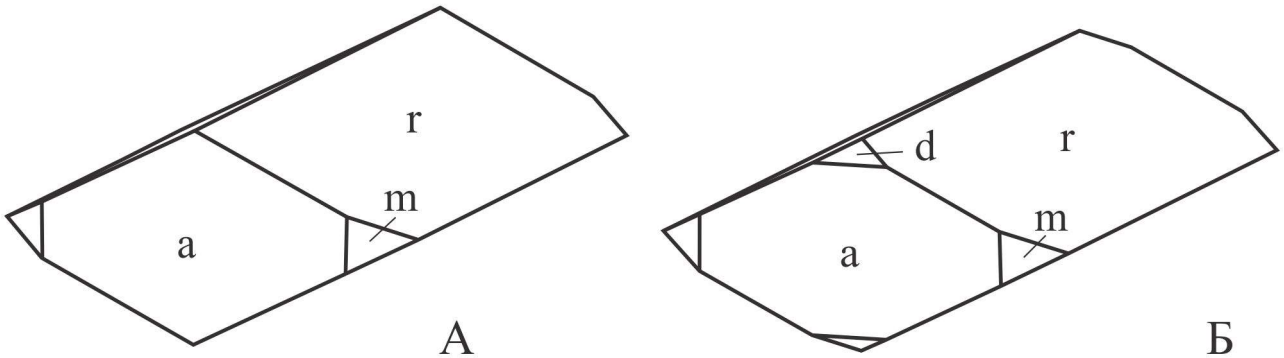



**Рисунок 1. Кристаллы святославита в ромбической сингонии. Дано по работам Б. В. Чеснокова:** А – по [4], Б – выполнен нами по данным работы [7].

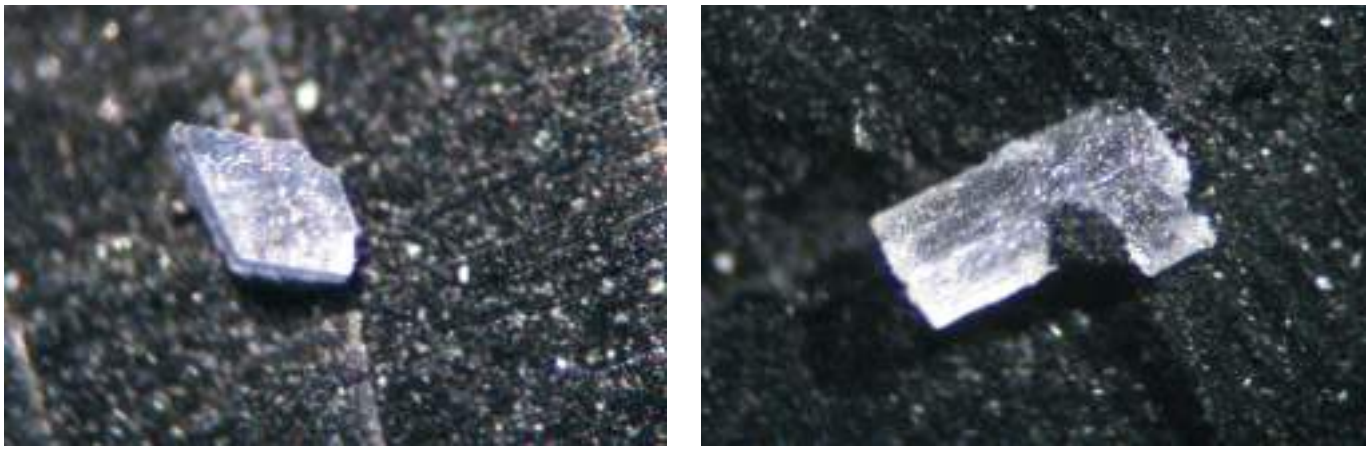


**Рисунок 2. Кристаллы святославита на подложке древесного угля. Образец из коллекции УГМ, размер кристаллов не более 1 мм. Здесь и далее фото Ю. В. Ерохина.**

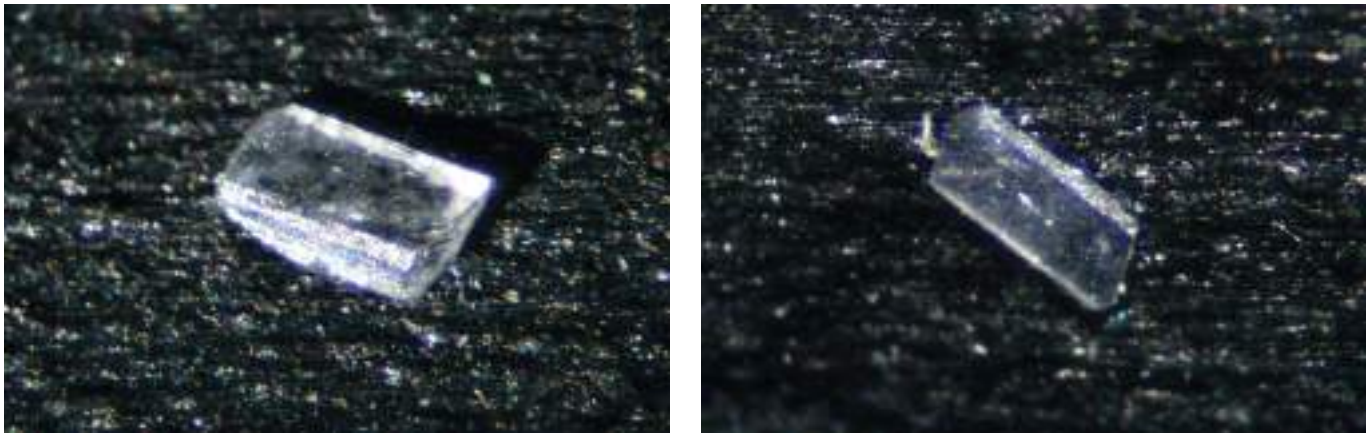


**Рисунок 3. Кристаллы святославита на подложке древесного угля. Образец из коллекции УГМ.**

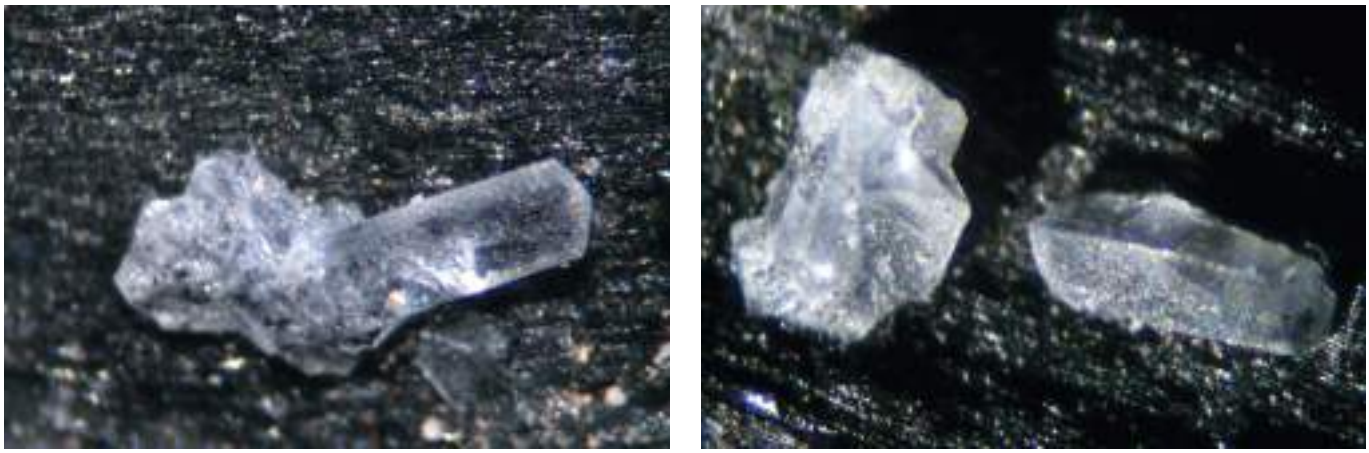


**Рисунок 4. Кристаллы святославита и их сростки на подложке древесного угля. Образец из коллекции УГМ.**

ющиеся на фоне кирпично-красных горелых пород в экскаваторных забоях. Вещество этих блоков сильно прокалено (местами до 800–900 °С) без доступа воздуха [6]. Кристаллы святославита имеют призматический облик, удлинены по [100]. Главными формами являются r{011} и a{100}, также имеются слабо развитые грани m{110}. Установка кристалла соответствует рентгеновской (рис. 1, А). В чуть более поздней работе [7] Б. В. Чесноков упоминает присутствие слабо развитых граней d{101} (рис. 1, Б).

Кристаллы бесцветные (рис. 2–5), блеск их стеклянный, черта белая. Твердость по шкале Мооса около 6, хрупкий. Спайность слабая по [100], излом раковистый. Плотность минерала измерена и равняется 2,695 г/см$^3$. Оптически двуосный (–), *Ng* = 1,581(2); *Nm* = 1,578(2); *Np* = 1,552(2); $2V_{выч}$ = 37,08°. Химический состав святославита (в мас. %): $SiO_2$ 43,56; $Al_2O_3$ 35,32; FeO 0,02; MgO 0,02; CaO 19,24; $Na_2O$ 0,42; $K_2O$ 0,01; Сумма 98,59, что хорошо пересчитывается $Ca[Al_2Si_2O_8]$.

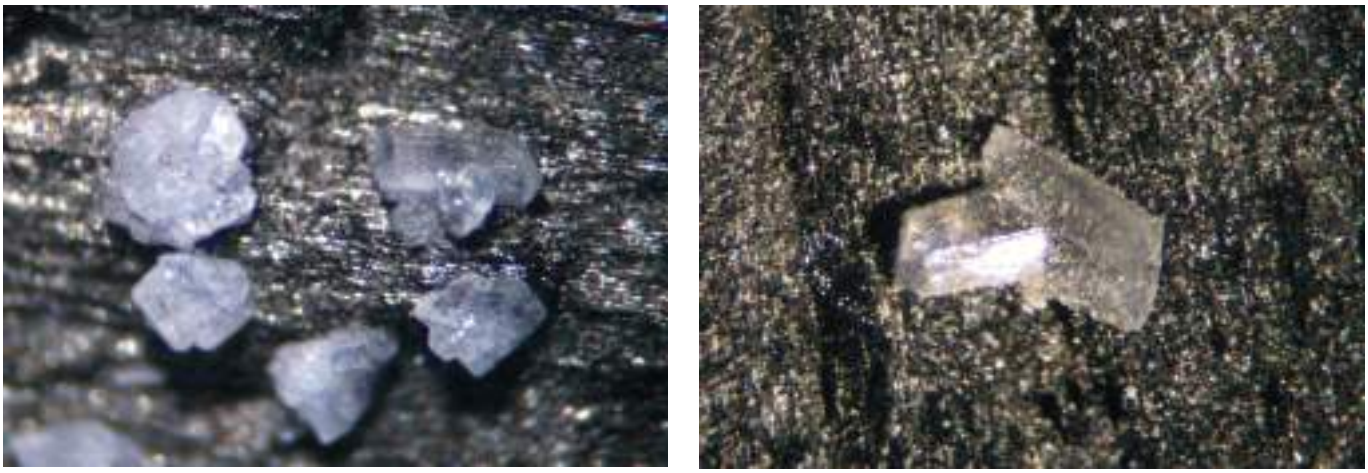


**Рисунок 5. Кристаллы святославита и их сростки на подложке древесного угля. Образец из коллекции УГМ.**

Порошкограмма минерала соответствует ромбической сингонии, пространственная группа $P2_12_12$; параметры элементарной ячейки следующие: $a$ = 8,232(5); $b$ = 8,606(10); $c$ = 4,852(5) Å; $V$ = 343,74 Å$^3$ [4].

В 2012 г. была проведена рентгеноструктурная ревизия минерала и установлено, что святославит все-таки имеет моноклинную (псевдоромбическую) сингонию с пространственной группой $P12_11$; параметры элементарной ячейки следующие: $a$ = 8,220(5); $b$ = 8,951(5); $c$ = 4,828(5) Å; β = 90,00(5)°; $V$ = 355,2(5) Å$^3$ [5].

Кристаллы святославита на стенках трещин в древесном угле находятся в ассоциации с кристаллами анортита, троилита, когенита, фаялита, титанита и графита. Все эти минералы образовались из газовой фазы при высокой температуре (не ниже 700–900 °С). Интересно, что совместных срастаний святославит и анортит не образуют и, судя по взаимоотношениям минералов, святославит кристаллизовался явно раньше анортита.

*Авторы выражают благодарность кандидату геол.-минерал. наук Д. А. Клейменову за помощь в работе над статьей.*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Святослав Несторович Иванов. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2001. 76 с.
2. Иванов К. С., Иванов Н. С., Богданова Е. И., Коротеев В. А., Русин А. И. Выдающийся геолог – Святослав Несторович Иванов // Уральский геологический журнал. 2013. № 2 (92). С. 55–82.
3. Шорин А. Г. Здания Уральского Горного // Изв. УГГУ. 2017. № 1 (45). С. 109–125.
4. Чесноков Б. В., Лотова Э. В., Павлюченко В. С., Усова Л. В., Бушмакин А. Ф., Нишанбаев Т. П. Святославит $CaAl_2Si_2O_8$ (ромбический) – новый минерал // Записки ВМО. 1989. Ч. 118. Вып. 2. С. 111–114.
5. Krivovichev S. V., Shcherbakova E. P., Nishanbaev T. P. The crystal structure of svyatoslavite and evolution of complexity during crystallization of a $CaAl_2Si_2O_8$ melt: a structural automata description // Canadian Mineralogist. 2012. Vol. 50. P. 585–592.
6. Чесноков Б. В., Михаль Т. А., Дерябина Т. Н. Типы техногенной минерализации отвалов Челябинского угольного бассейна // Минералы месторождений Южного и Среднего Урала: сб. статей. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1985. С. 47–58.
7. Чесноков Б. В., Щербакова Е. П. Минералогия горелых отвалов Челябинского угольного бассейна (опыт минералогии техногенеза). М.: Наука, 1991. 152 с.

## REFERENCES

1. 2001, Svyatoslav Nestorovich Ivanov. Ekaterinburg, 76 p.
2. Ivanov K. S., Ivanov N. S., Bogdanova E. I., Koroteev V. A., Rusin A. I. 2013, Distinguished figure in geology – Svyatoslav Nestorovich Ivanov. *Ural'skiy geologicheskiy zhurnal* [Uralian Geological Journal], no. 2 (92), pp. 55–82. (*In Russ.*)
3. Shorin A. G. 2017, Buildings of the Ural Mining University. *Izvestiya UGGU* [News of the Ural State Mining University], no. 1 (45), pp. 109–125. (*In Russ.*)
4. Chesnokov B. V., Lotova E. V., Pavlyuchenko V. S., Usova L. V., Bushmakin A. F., T Nishanbaev T. P. 1989, Svyatoslavite $CaAl_2Si_2O_8$ (rhombic) – a new mineral. *Zapiski RMO* (Proceedings of the Russian Mineralogical Society), part 118, issue 2, pp. 111–114. (*In Russ.*)
5. Krivovichev S. V., Shcherbakova E. P., Nishanbaev T. P. 2012, The crystal structure of svyatoslavite and evolution of complexity during crystallization of a $CaAl_2Si_2O_8$ melt: a structural automata description. *Canadian Mineralogist*, vol. 50, pp. 585–592.
6. Chesnokov B. V., Mikhal T. A., Deryabina T. N. 1985, *Tipy tekhnogennoy mineralizatsii otvalov Chelyabinskogo ugol'nogo basseyna* [Types of technogenic mineralization of dumps of the Chelyabinsk basin]. Minerals of deposits of the Southern and Middle Urals: collection of papers. Sverdlovsk, pp. 47–58.
7. Chesnokov B. V., Shcherbakova E. P. 1991, *Mineralogiya gorelykh otvalov Chelyabinskogo ugol'nogo basseyna (opyt mineralogii tekhnogeneza)* [Mineralogy of burnt dumps of the Chelyabinsk basin (the experience of mineralogy of technogenesis)]. Moscow, 152 p.

*Статья поступила в редакцию 8 января 2019 г.*

# Геофизический факультет и его вариации*

**Владимир Викторович ФИЛАТОВ****

Владимирский государственный университет им. А. Г. и Н. Г. Столетовых, Россия, Владимир

**Vladimir Viktorovich FILATOV****

Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, Vladimir, Russia

# Geophysics department and its variations*

**The history of the geophysics department has been lasted for about half a century: from 1951 to 2000. Due to external factors, its departmental structure took a long time to form; the names of departments, heads, and deans have changed. Staff members were the most gifted graduates of the initial department of geophysics. This circumstance was largely due to scientific and pedagogical authority of the department as one of the leading centers of Soviet geophysics in all its main directions: electrical prospecting, borehole geophysics, geochemistry, radiometrics and nuclear geophysics, gravity and magnetics, seismic measurements. In 2000, the Institute of Geology and Geophysics was established on the basis of the geological and geophysics departments. It was rearranged into the Department of Geology and Geophysics ten years later.**

***Keywords:*** **Faculty of Geophysics, Deans, Departments of Ore and General Geophysics, G. P. Sakovtsev, A. K. Kozyrin, Institute of Geology and Geophysics, department of geology and geophysics.**

**История геофизического факультета продолжалась около полувека: с 1951 по 2000 г. По объективным и субъективным причинам долго формировалась его кафедральная структура, менялись названия кафедр, заведующие, деканы, но кадровый состав факультета почти целиком составляли наиболее одаренные выпускники первоначальной кафедры геофизики и факультета. Этим обстоятельством в значительной мере был обусловлен научно-педагогический авторитет факультета как одного из ведущих центров советской геофизики по всем ее основным направлениям: электроразведка, скважинная геофизика, геохимия, радиометрия и ядерная геофизика, гравимагниторазведка, сейсморазведка. В 2000 г. на базе геологического и геофизического факультетов был создан Институт геологии и геофизики. Спустя 10 лет он был реорганизован в факультет геологии и геофизики.**

***Ключевые слова:*** **геофизический факультет, деканы, кафедры рудной и общей геофизики, Г. П. Саковцев, А. К. Козырин, Институт геологии и геофизики, факультет геологии и геофизики.**

К началу 1950-х гг. все геофизические методы получили существенное развитие и, как следствие, значительную обособленность: теоретическую, методическую и аппаратурную. Поэтому началась «селекция» инженеров-геофизиков по методам исследований применительно к решению различных геологических задач. Этот естественный процесс стал регулироваться при обучении путем введения трех специализаций: геофизические методы поисков и разведки полезных ископаемых, геофизические методы поисков и разведки нефтяных и газовых месторождений и геофизические методы разведки месторождений редких и радиоактивных руд.

Нефтяной факультет в Свердловском горном институте, дав всего два выпуска инженеров-нефтяников, просуществовал недолго – до 1957 г. Затем руководство института, поступив очень и очень недальновидно, расформировало его, а на базе кафедры геологии нефти и газа была создана кафедра геологии горючих ископаемых. В связи с расформированием нефтяного факультета была прекращена подготовка инженеров-геофизиков по специализации геофизические методы поисков и разведки нефтяных и газовых месторождений.

Введение в учебные планы специализаций, а также то, что одни и те же геологические задачи могут быть решены с различной успешностью разными геофизическими методами (а лучше их некоторой совокупностью, называемой комплексированием), привело к тому, что геофизический факультет несколько лет не мог обрести устойчивую кафедральную структуру.

Первоначально геофизическую основу факультета составили кафедра геофизики и кафедра «специальных методов разведки» [1]; кафедры математики и физики играли при этом хоть и важную, но только вспомогательную роль.

Из неясного названия кафедры специальных методов следовало, что в геофизике, кроме традиционных, были тогда и специальные методы разведки. Да, были. Эти методы применяли для поисков и разведки месторождений радиоактивных и редкометалльных руд, являвшихся сырьем для производства ядерного оружия и для атомной энергетики.

Студенты стали изучать специальные методы разведки, лекции по которым читал Николай Александрович Иванов еще на кафедре геофизических методов разведки с 1949 г. Но чтобы удовлетворить гигантские потребности промышленности в ядерном сырье, необходимо было широко развернуть его поиски по всей стране. Решить эту задачу могло только большое количество специалистов, для подготовки которых и были созданы в различных вузах страны

*filatov47@bk.ru

**Продолжение серии статей В. В. Филатова, посвященных развитию геофизики на Урале. См.: История геофизических исследований на Урале в XVII – начале XIX в. (Изв. УГГУ, № 2(42), 2016. С. 91–93; П. К. Соболевский – основоположник Уральской геофизической школы (Изв. УГГУ, № 4 (44), 2016. С. 99–102); Геофизические исследования на Урале в 20-е – 30-е годы XX века (Изв. УГГУ, № 1(45), 2017. С. 100–103); Они были первыми или дороги, которые нас выбирают (Изв. УГГУ, № 2 (46), 2017. С. 114–117); Спонтанный поток материи (Изв. УГГУ, № 3 (47), 2017. С. 119–120); Выдающиеся ученики П. К. Соболевского (Изв. УГГУ, № 4(48), 2017. С. 123–129); От кафедры геофизики до геофизического факультета (Изв. УГГУ, № 3(51), 2018. С. 176–180).

*Кафедра общей геофизики, 1967.*
*Слева направо: первый ряд (сидят) – Л. М. Государева, Н. А. Зубрицкая, Г. Д. Дементьева, А. Я. Ярош, Л. В. Красильникова, Е. К. Микшевич, Р. И. Хмелинина;*
*второй ряд – Б. В. Дорофеев, В. И. Бондарев, Н. А. Плохих, Л. А. Стенин, Г. И. Гринкевич, А. С. Филюшкин, А. Б. Поляков;*
*третий ряд – ..., П. П. Захаров, Г. Я. Дементьев, В. Н. Шмаков.*

«специальные кафедры». «Туманное» же название эти кафедры получили из соображений повышенной секретности, как все, что имело тогда хоть какое-то отношение к атомной промышленности.

Самостоятельной кафедра специальных методов была недолго. Со временем она стала частью другой кафедры, образованной при разделении кафедры геофизики на кафедру магнитогравиразведки во главе с Н. А. Ивановым и кафедру электросейсморазведки во главе с Г. П. Саковцевым. В 1953 г. на базе кафедры специальных методов была создана кафедра рудной геофизики, полное название которой было таким: кафедра геофизических методов поисков и разведки редких и радиоактивных металлов. Чуть позже ее объединили с кафедрой электросейсморазведки. Заведовать этой кафедрой стал Иванов, а заведующим кафедрой магнитогравиразведки был назначен А. Я. Ярош.

Спустя три года произошло очередное преобразование: дисциплину «Сейсморазведка» передали на кафедру магнитогравиразведки. После этого кафедру переименовали. Она получила название «Кафедра геофизических методов поисков и разведки полезных ископаемых». Но в обиходе ее стали называть короче – кафедра общей геофизики. Будучи студентом третьего курса, я по поручению заведующего лабораторией кафедры А. С. Филюшкина сделал вывеску кафедры: взял лист стекла, покрасил его черным лаком; когда лак застыл, то выскоблил надпись «Кафедра общей геофизики» и закрасил буквы бронзовой краской; вставил стекло в рамку и повесил высоко над входной дверью на кафедру.

Кафедральная нестабильность факультета усугублялась еще и кадровыми пертурбациями. В феврале 1953 г. Иванов был освобожден от должности декана в связи с откомандированием в докторантуру в Геофизический институт АН СССР. Деканом стал Ярош. Через год Иванов попросил освободить его и от заведования кафедрой. В ноябре 1954 г., когда до защиты диссертации оставалось несколько месяцев, Иванова снова назначили деканом из-за отказа Яроша, у которого возникли какие-то личные проблемы. Наконец в марте 1955 г. диссертация под названием «Магнитные измерения в скважинах», была успешно защищена, и Николай Александрович стал доктором технических наук.

Докторантура, руководство факультетом, заведование кафедрой подорвали здоровье Иванова, и он заболел. Поэтому в начале 1956 г. он отказался от обязанностей декана и председателя Совета геологоразведочного и геофизического факультетов. Эту работу стал выполнять доцент-геолог А. И. Шерстюк. Правда, через полгода, когда Н. А. Иванов был утвержден в звании профессора, его уговорили вернуться в деканат и назначили заведующим кафедрой рудной геофизики. Но он понял, что опять переоценил свои силы, и начал постепенно освобождаться от своих обязанностей в институте, вознамерившись сменить и место работы.

В феврале 1957 г. Иванов сложил полномочия декана, в июле прошел конкурс и был избран заведующим лабораторией магнитных методов разведки в Горно-геологическом институте УФАНа. В начале октября Отделение технических наук АН СССР, академиком-секретарем которого был Л. Д. Шевяков (1889–1963), утвердило результаты конкурса, в ноябре Иванова освободили от заведования кафедрой, и он стал сотрудником академического института с окладом в 5000 рублей в месяц [2]. Но его связь с геофизическим факультетом, конечно же, не могла прерваться. Академиче-

ское руководство разрешило ему преподавать. Почти двадцать лет он читал на геофизическом факультете курс лекций по методам радиоактивной разведки.

В 1958 г. Горно-геологический институт Уральского филиала АН СССР был разделен на три самостоятельных института. На базе геофизического отдела был создан Институт геофизики, в котором Иванов, заведуя лабораторией геомагнетизма и магнитометрии, проработал плодотворно еще двадцать лет до дня своей смерти, случившейся 13 февраля 1978 г. от инфаркта миокарда. И в эти два десятка лет круг его интересов был очень широк. Он руководил исследованиями по изучению аномалий векового хода, разрабатывал методики и приборы для поисков глубокозалегающих месторождений железных руд, изучал остаточную намагниченность пород и руд, курировал геомагнитные исследования в республиках СССР, состоял членом редакции журнала «Геомагнетизм и аэрономия» и Научного Совета по геомагнетизму при Президиуме АН СССР, пестовал аспирантов и докторантов, участвовал в экспедиционных исследованиях.

Его деятельность ученого была оценена правительственными наградами: орденом «Знак Почета» и несколькими медалями СССР; его личностные достоинства – скромность, обаяние и деликатность – высоко ценились коллегами, друзьями и учениками.

II

С 1957 по 1985 г. кафедрой рудной геофизики руководил Глеб Павлович Саковцев. В истории уральской геофизики, высшего геофизического образования и в истории Свердловского горного института Глеб Павлович – личность выдающаяся во многих отношениях: научном, педагогическом и административном.

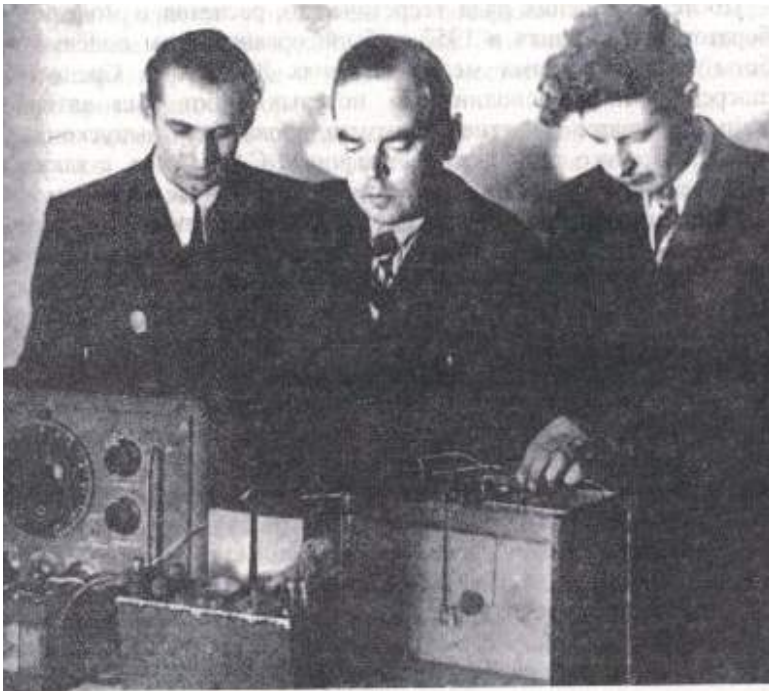
Он родился 9 ноября 1912 г. в одном из стариннейших русских городов – Великом Устюге. Его отец Павел Михайлович, начав работать с 12 лет сидельцем в лавках города, к 1917 г. дослужился до приказчика в торговой фирме Дербенёвых; после революции работал торговым агентом в различных торговых и кооперативных организация, заведовал хозяйственной частью в кооперативном и медицинском техникумах; в 1940 г. он погиб при исполнении служебных обязанностей [3].

Мать Любовь Ивановна, пережившая мужа на четырнадцать лет, до революции работала учительницей, а позднее занималась только семьей, в которой кроме Глеба было еще трое детей. В 1938 г. (?) в одной из автобиографий Глеб Павлович скупо описал свою семью, рассказав, что у него есть старший брат, который учится в аспирантуре в Московском геодезическом институте; что второй брат служит в армии, а сестра –техник-строитель – работает в Горьковском крае. Вот и вся родословная семьи Саковцевых [4]. Опираясь на эту родословную, даже провидец не смог бы предсказать, как сложится жизнь Глеба Павловича и каких он достигнет в ней результатов.

К началу XX в., когда Глеб учился в школе, Великий Устюг, пережив пору своего величия и расцвета в XVII в., был административным и крупнейшим экономическим и культурным центром Северо-Двинской губернии. В городе с населением около 19 тысяч человек было 13 школ разных ступеней, 4 техникума, губернская партийная школа, центральная библиотека, ламповая концертная радиостанция и много выдающихся архитектурно-художественных памятников. Для молодого и любознательного человеку, а Глеб был именно таким, все эти и многие другие блага цивилизации стали основой для его будущего развития.

Но безответен вопрос о том, почему Глеб после окончания школы в 1931 г. и годичной работы в плановом отделе райколхозсоюза поступил учиться в 1932 г. именно на геофизическую специальность в Уральский геологоразведоч-

*Профессор Г. П. Саковцев.*



*Первые испытания электролитического способа измерения удельного сопротивления образцов (1955 г.).*
*Слева направо: А. А, Редозубов, Г. П. Саковцев, Л. С. Тальвинский.*

*Кафедра рудной геофизики в 1967 году.*
*Слева направо: первый ряд – З. П. Алексеева, Л. В. Красильникова, Г. С. Возженников, Г. П. Саковцев, А. И. Соколова, В. Н. Микшевич, Н. Н. Бреднева, А. С. Истомина;*
*второй ряд – А. Т. Марков, А. А. Редозубов, С. А. Игумнов, А. К. Козырин, М. И. Выгузова, И. Н. Антонова, И. Г. Сковородников, Ю. Н. Гудков, Л. А, Стенин, А. В. Тетюхин;*
*третий ряд – С. С. Сысков, И. И. Бреднев, В. И. Горев, В. М. Сапожников, Н. И. Выгузов, Ю. Б. Давыдов, Н. И. Васильвицкий.*

ный институт? Кто или что определил этот его выбор? От кого он узнал об уральском вузе и о геофизике – науки в то время еще достаточно экзотичной и мало кому известной, особенно в провинции, далекой от научных центров, в которых она только начинала создаваться?

Через шесть лет Саковцев закончил с отличием уже Свердловский горный институт и был приглашен после года работы прорабом в Красноуральской геофизической партии в аспирантуру. Еще будучи студентом, он стал под руководством В. Н. Головцына специализироваться в области методов электроразведки на постоянном токе. Свои студенческие исследования он продолжил и в аспирантуре, учебу в которой завершил спустя три года также с отличием защитой кандидатской диссертации с очень длинным названием «Анализ электроразведочных работ, проведенных на сульфидных месторождениях Кушвинского района с 1925 по 1940 г., и предложения по улучшению методики и интерпретации результатов» [5].

Развитием методов электроразведки для решения геологических задач при поисках медноколчеданных месторождений на Урале Саковцев занимался всю жизнь. Этой проблеме была посвящена его докторская диссертация «Разработка и применение комплекса геофизических методов при поисках колчеданных месторождений на Урале», которую он защитил в 1959 г. С этой же целью он создал Проблемную лабораторию поисков глубокозалегающих рудных месторождений и был ее научным руководителем с 1975 по 1985 г.

Но неизмеримо более весомы результаты работы Саковцева в качестве ректора Свердловского горного института. Первый уральский вуз Глеб Павлович возглавлял с 1960 по 1981 г. Этот период в истории вуза следует обоснованно назвать «Саковцевским». Горный институт в эти годы получил такое масштабное и всестороннее развитие, какого не было ни до этого, ни много позже. Велик был и авторитет Глеба Павловича у властей области, города и у коллег-ректоров свердловских вузов; он был ректором ректоров, возглавляя в течение многих лет Совет ректоров Свердловской области. Именно в эти годы благодаря его усилиям был сделан пристрой к третьему учебному зданию, построены база учебно-методической практики в пос. Верхняя Сысерть, четвертое учебное здание, Дом спорта, два многоэтажных жилых дома – всего не перечислишь. «Глеб-строитель» – так его уважительно величали.

Глеб Павлович умер неожиданно 24 января 1985 г. Гроб с его телом для прощания был установлен в актовом зале первого учебного корпуса. У подножия гроба среди венков и цветов на атласных подушечках красного цвета лежали его награды – ордена Ленина, Трудового Красного Знамени, «Знак Почета» и «Шахтерская слава». Прощание было многолюдным, все искренне сожалели о постигшей их утрате.

Среди почти двух десятков ректоров и директоров института деятельность Саковцева сопоставима только с деятельностью Петра Петровича фон Веймарна (1879–1935).

## III

Кафедральная структура факультета, сложившаяся к 1957 г., оставалась неизменной 23 года, пока в 1980 г. из кафедры рудной геофизики не выделили кафедру ядерной геофизики, которую возглавил Г. С. Возженников. Эта струк-

турная перестройка была обусловлена значительным развитием ядерной геофизики; двум направлениям – рудной и ядерной геофизики – стало по многим причинам «тесно» в рамках одной кафедры как двум медведям в одной берлоге. Каждой кафедре нужна была свобода. И обе ее получили с пользой для обоюдного и очень плодотворного развития. Так, кафедра специальных методов разведки снова обрела самостоятельность, но уже под другим названием и на качественно значительно более высоком уровне.

Кафедру общей геофизики тогда же переименовали в кафедру структурной геофизики и геокартирования, поскольку в научном, а следовательно, и в учебном отношениях сотрудники кафедры стали заниматься развитием методов комплексных геофизических исследований для решения структурно-картировочных задач. Спустя десять лет кафедре дали более короткое называние – кафедра структурной геофизики. Эту кафедру в различные годы возглавляли доценты Г. И. Гринкевич и Г. Я. Дементьев и профессор В. Н. Бондарев. Звание профессора и аттестат профессора в январе 1993 г. я получил именно по этой кафедре.

После Иванова и Яроша деканскую «лямку» тянули Гринкевич (1957–1961), Б. В. Дорофеев (1961–1964), Поляков (1964–1967), А. А. Редозубов (1967–1970, 1980–1986), Возжеников (1970–1976), Г. Я. Дементьев (1976–1980), С. С. Сысков (1986–1995) и мой однокурсник В. А. Серков (1995–2000).

Серков стал последним деканом в истории факультета. По велению времени он в отличие от его предшественников был не назначен на эту должность, а избран конференцией коллектива сотрудников факультета. Конкурентом Серкова на выборах, которые проходили в конференц-зале третьего учебного здания, был профессор Бондарев. Обсуждение кандидатов и их программ было продолжительным и эмоциональным, поскольку и ментальность, и научно-педагогические «веса» каждого из них были существенно различными. Но делегаты отдали предпочтение не жесткому и многоопытному профессору, а предсказуемому и толерантному доценту, которого неявно поддержал и присутствовавший на собрании ректор И. В. Дементьев (1932–2009). А в 2000 г. тот же Дементьев, приоритеты которого к этому времени изменились, отправил Серкова в отставку.

Социально-политические и экономические реформы, начавшиеся в стране в 1990 г., драматизировали и продолжают драматизировать состояние высшей школы, вынуждая ее приспосабливаться к складывающимся обстоятельствам. В 1991–1995 гг. существенно уменьшился конкурс среди абитуриентов, произошло сокращение плана приема на первый курс, резко упал спрос на инженеров-геофизиков. Поэтому в июне 1995 г. Ученый совет геофизического факультета принял решение о преобразовании кафедр рудной (называвшейся к этому времени кафедрой рудной и промысловой геофизики) и ядерной геофизики. На базе этих кафедр были созданы кафедра прикладной геофизики и кафедра геоинформатики.

На кафедре прикладной геофизики, заведовать которой стал профессор И. Г. Сковородников, готовили инженеров по специализациям: «Геофизические исследования скважин» и «Ядерно-геофизические методы». Кафедру геоинформатики возглавил доцент В. Б. Писецкий. Ее выпускники специализировались в области применения геоинформационных систем в разведочной геофизике и систем регистрации и обработки геофизической информации. Спустя четыре года на этой кафедре была открыта подготовка по специализации «Информационные системы в технике и технологиях».

## IV

Из многих специальностей и специализаций, культивировавшихся в разное время на кафедре геофизики и на геофизическом факультете, одна сохранилась с послевоенного времени – это специализация «Геофизические исследования скважин». Ее основоположником и организатором в СГИ был Анатолий Константинович Козырин – человек, безусловно, легендарный. О таких людях, как Козырин, принято говорить, что он сделал себя сам.

Он – коренной уралец, родился накануне Великой Октябрьской социалистической революции 20 октября 1917 г. в поселке Ревдинского завода Пермской губернии в семье горного десятника, работавшего на Черноисточинских платиновых приисках; мать, мещанка по происхождению, была учительницей.

Жизнь семьи Козыриных была похожа на жизнь семей военных. Отца часто переводили с одного горного предприятия на другое. Сменив несколько школ, Анатолий получил полное среднее образование в 1936 г. в школе № 1 в г. Кушве, где отец в то время работал начальником промывальной фабрики на Гороблагодатском руднике. Школа была закончена с аттестатом I-й степени, т. е. с отличием, и по закону того времени Анатолий получил право поступать в любой вуз без вступительных испытаний. Выбрал он физико-математический факультет Уральского государственного университета, поскольку у него была склонность к точным наукам.

Все экзамены за первый курс были сданы им на «отлично», и дирекция университета премировала рачительного студента грамотой. Так бы успешно, вероятно, и дальше могла продолжиться жизнь Анатолия, если бы он не «заболел» небом. «Учась на II–III курсах университета, – вспоминал он, – я окончил курсы летчиков-наблюдателей при областном аэроклубе…, сдав теорию и полеты комиссии НКО (Наркомат обороны. – *В. Ф.*) на «хорошо». Кроме того, получил звание парашютиста II-й ступени».

При такой увлеченности авиацией учеба была, естественно, заброшена и, как следствие этого, успешного летнаба и парашютиста на III курсе отчислили из университета. Зиму 1939 г. он, вернувшись в Кушву, проработал вместе с матерью на курсах мастеров социалистического труда при Гороблагодатском рудоуправлении: мать преподавала историю, сын – физику и математику. А осенью Анатолий опять стал учиться, но не в университете, где так «плохо» с ним обошлись, а на II курсе геологоразведочного факультета в Свердловском горном институте. Война прервала его учебу. На III курс в СГИ он вернулся только в 1945 г.

Свою военно-фронтовую жизнь он описал коротко и сдержанно просто в автобиографии, датировав ее предпоследним днем 1947 г.: *«После окончания III курса в сентябре 1941 г. был призван Свердловским горвоенкоматом в ряды РККА и направлен в военно-воздушную школу в г. Уфу, где проходил службу в должности курсанта. По расформиро-*

Студент А. К. Козырин.

*вании школы учился в военно-инженерном училище в г. Златоусте. Училище окончил в 1942 г. и был направлен в звании лейтенанта инженерных войск в 7-й воздушно-десантный корпус, где проходил службу в должности командира саперно-подрывного взвода отдельной роты 5-й бригады. По расформировании последней приказом по корпусу был направлен на должность командира пулеметного взвода в 5-й полк 2-й Гвардейской стрелково-парашютной дивизии. В боях под Ст. Руссой 28-го февраля 1943 г. я был ранен гранатой в бедро правой ноги. Левая нога была ... отморожена, пока я лежал на снегу и в полевом госпитале, мне ампутировали обе ноги. Закончив лечение в г. Ташкенте, я был увезен матерью на Гороблагодатский рудник, где спустя некоторое время стал работать ст. коллектором в геологоразведочной партии треста Уралгорметразведка. Зимой 1945 г. я возобновил учебу на III курсе в горном институте, как и раньше на кафедре геофизики»* [6].

Война, жестоко надругавшаяся над телом Анатолия, не разрушила его духовно-нравственной сущности, не сломила его волю к жизни, не сделала мизантропом, а условия советской действительности способствовали раскрытию его уникального интеллектуально потенциала.

Демобилизованным студентам, особенно инвалидам войны, в институте с 1944 г. были созданы прекрасные по тому времени бытовые условия: их селили в лучших комнатах общежития на ул. Малышева, для них была отдельная столовая, снабженцы резервировали им промтовары и мануфактуру, в библиотеке обслуживали вне очереди, отличники учебы, в том числе и Анатолий Константинович, получали стипендию имени товарища Сталина [7].

Но не только хлебом единым жив человек. Особенно человек креативный. За три года учебы студент Козырин написал несколько небольших реферативных работ по геофизике, математике, разведочному делу; на двух последних курсах профессор Головцын ему «весьма содействовал» в изучении электрического каротажа и, как оказалось, эта область геофизики стала основной в научной деятельности Анатолия Константиновича. В 1947 г. он защитил дипломный проект на тему: «Каротаж скважин Буланашского месторождения», в котором впервые им была сделана попытка исследовать аналитически вопрос о картировании в угольных скважинах пластов высокого сопротивления. Проект Козырина положил начало систематического развития на Урале каротажа скважин. Члены Государственной экзаменационной комиссии высоко оценили его результаты, о которых он доложил в геофизическом отделе Горно-геологического института УФАНа, а местом его работы стал научно-исследовательский сектор alma mater.

Таким образом, в 1947 г. Козырин ступил на единственную уготованную ему дорогу. Он ее не выбирал. Его на эту дорогу поставил Головцын. Но Козырин интуитивно понял, что эта дорога не заведет его в тупик. И если первоначально,

Профессор А. К. Козырин.

*Методическая практика в пос. Верхняя Сысерть. Слева направо: второй – И. Г. Сковородников, третий – А. К. Козырин.*

образно говоря, его передвижение «на одном протезе с помощью костыля и палочки» было «ограничено состоянием дороги и расстоянием», то со временем эти физические трудности стали обыденностью, бытовым «фоном», обочиной прямого, как стрела, шоссе. «С помощью костыля и палочки» он двигался по нему быстрее и успешнее, чем иные на автомобиле: в 1950 г., развивая идеи, сформулированные еще в дипломном проекте, он защитил кандидатскую диссертацию на тему: «Электрический каротаж на месторождениях ископаемых углей восточного склона Урала»; свое пятидесятилетие он ознаменовал защитой докторской диссертации: «Метод электрической корреляции при поисках и разведке рудных месторождений», в которой он изложил суть, основы, методику и результаты важнейшего метода каротажа [8].

Значимость сделанного Козыриным так велика, что способствовала возникновению нового научного направления в разведочной геофизики, которое Анатолий Константинович назвал ***скважинной геофизикой***. Научные новации привели и к расширению программы обучения инженеров-геофизиков, в которой благодаря деятельности профессоров Козырина и Саковцева появилась специализация «Геофизические исследования скважин».

После защиты докторской диссертации Анатолий Константинович проработал еще тридцать три года, развивая теорию и методики методов скважинной электроразведки, создал научную школу, стал заслуженным деятелем науки и технике РФ, был награжден орденами Трудового Красного Знамени и Отечественной войны I степени, медалями СССР и ведомственными знаками отличия и оставил навек о себе благодарную памяти в умах и сердцах коллег, учеников и студентов.

## V

На рубеже тысячелетий, в 2000 г., в истории двух факультетов – геологического и геофизического – произошло неординарное событие. Спустя 49 лет после их самостоятельного функционирования они были объединены, но не в факультет, как прежде, а в институт, получивший название Институт геологии и геофизики (ИГиГ) в составе Уральской государственной горно-геологической академии (УГГГА). Такой структуры в вузе еще не было. Новизна ее была в чем-то завораживающей. Поэтому, когда решение об объединении факультетов в институт утверждалось на заседании Ученого совета УГГГА, то декан горно-механического факультета профессор В. З. Козин с некоторой завистью воскликнул: «Почему нам не пришла идея создать на нашем факультете институт»! Но, сказав эмоционально «а», он почему-то позже не захотел сказать «б» и не организовал на базе своего факультета институт.

Директором ИГиГа был назначен не один из идеологов и инициаторов его организации А. Г. Талалай, а профессор-геолог В. В. Бабенко. По замыслу организаторов, ИГиГ должен был способствовать «оптимизации структуры УГГГА для создания условий перехода к системе подготовки специалистов на основе научно-образовательных центров» (НОЦ). Поэтому прогнозировалось, что Институту будет оказана большая поддержка и он войдет в широкую кооперацию с научно-исследовательскими институтами и производственными геофизическими организациями. Красиво офор-

мленные списки партнеров ИГиГа до сих пор висят на стене рядом с парадной лестницей в третьем учебном здании университета.

Через десять лет ИГиГ, не оправдав ожиданий, которые на него возлагались, был понижен в статусе и реорганизован в факультет геологии и геофизики (ФГиГ), состоящий из тринадцати кафедр. На двух кафедрах факультета готовят бакалавров, магистров и аспирантов: на кафедре геофизики, руководимой профессором Талалаем, по специальностям «Геофизические методы поисков и разведки месторождений полезных ископаемых» и «Геофизические методы исследования скважин»; на кафедре геофизики нефти и газа, которой заведует профессор В. Н. Бондарев, по специальности «Геофизические методы поисков и разведки месторождений полезных ископаемых» со специализацией «Сейсморазведка».

С 1929 г. кафедрами геофизики было подготовлено около 6 тысяч инженеров-геофизиков, бакалавров и магистров различных специальностей не только для нашей страны, но и для стран народной демократии: Болгарии, Венгрии, Польши, Румынии, Чехословакии, Китая и Монголии. Поэтому можно подвести некоторый статистический итог деятельности Уральской геофизической школы.

Среди ее выпускников пять лауреатов Ленинской премии, один Герой Социалистического Труда, девятнадцать лауреатов Государственной премии СССР и УССР и премии Правительства РФ, четырнадцать первооткрывателей месторождений, около 80 докторов наук; пятнадцать выпускников создали свои школы-кафедры в других вузах: Д. С. Миков – в Томском политехническом, К. Н. Ансимов и Г. С. Вахромеев (1934–2000) – в Иркутском политехническом институте, А. П. Булмасов (1910–1980) – в Иркутском университете и в Ивано-Франковском институте нефти и газа, А. А.Непомнящих – в Казахском политехническом, А. Г. Карелин (1911–1972) – в Ташкентском политехническом институте, И. Л. Никольский – в Донецком политехническом, В. Н. Головцын – в Киевском университете, А. А. Юньков – в Днепропетровском горном, С. И. Восанчук – в Львовском политехническом институте, Б. П. Притчин (1936–1996) – в Новочеркасском политехническом, Е. М. Квятковский – в Ленинградском горном институте, В. Иванова и Т. Добрев – в Софийском горно-геологическом институте; большая часть сотрудников Института геофизики УрО РАН – это выпускники геофизического факультета.

А сколько выпускников-геофизиков стало крупными организаторами геолого-геофизического производства, руководителями академических, научно-исследовательских и проектных институтов, администраторами различных уровней. Во втором издании своего биографического справочника «Уральская геофизическая школа» я привел сведения о 317 именитых выпускниках [9]. И этот список далеко не полный

Почти 260 лет тому назад, а точнее 257, французский аббат и астроном, член Парижской и Российской академий наук Жан Шапп д' Отрош, «не доброхот России», как его справедливо охарактеризовал М. В. Ломоносов (1711–1765), выполнив в Екатеринбурге первое немудрящее геофизическое исследование, заложил, не ведая об этом, первый камень в фундамент здания уральской геофизики. После этого события сто шестьдесят лет она находилась в эмбриональном состоянии, пока в 1920-х гг. Петр Константинович Соболевский не задал стратегический вектор ее развития. И спустя полвека уральская геофизика достигла своего расцвета. Этот период продолжался недолго, около двадцати лет. Социально-политические события, разрушившие великую страну Советский Союз, стали деструктивными и для геофизики. Что ждет ее впереди? Гадать не буду. Загад, как говорится, не бывает богат. Всякие прогнозы, предсказания и пророчества – дело лукавое и неблагодарное, как гадание на кофейной гуще. Поэтому подожду с прогнозами. Поживем – увидим.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Микшевич В. Н. Воспоминания об организации и работе кафедры рудной геофизики // Институт геологии и геофизики Уральской государственной горно-геологической академии. Екатеринбург: Изд-во УГГГА, 2002. С. 13–24.
2. Архив Института геофизики УрО РАН. Личное дело Н. А. Иванова.
3. Архив УГГУ (АУГГУ). Личное дело Г. П. Саковцева. Автобиография. Л. 5.
4. Там же. Л. 1.
5. Там же. Л. 14.
6. АУГГУ. Личное дело А. К. Козырина. Автобиография. Л. 11.
7. Государственный архив Свердловской области, ф. 1151-р, оп. 1, ед.хр. 265, л. 10, л. 14.
8. Филатов В. В. Профессора Уральского государственного горного университета: биограф. справочник. 4-е изд., испр. и доп. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2009. 479 с.
9. Филатов В. В. Уральская геофизическая школа (60 лет геофизическому факультету Уральского государственного горного университета. 1951–2011 гг.): биограф. справочник. 2-е изд., испр. и доп. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2011. 461 с.

## REFERENCES

1. Mikshevich V. N. 2002, *Vospominaniya ob organizatsii i rabote kafedry rudnoy geofiziki* [Memories of the structure and work of the department of ore geophysics]. Institute of Geology and Geophysics of the Ural State Mining and Geological Academy. Ekaterinburg, pp. 13–24.
2. Archive of the Institute of Geophysics of UB RAS. Personal file of N. A. Ivanov.
3. Archive of the Ural State Mining University (AUGGU). Personal file of G. P. Sakovtsev. Autobiography. Sheet 5.
4. Ibidem. Sheet 1.
5. Ibidem. Sheet 14.
6. Ural State Mining University (AUGGU). Personal file of A. K. Kozyrina. Autobiography. Sheet 11.
7. State archive of the Sverdlovsk region, archive 1151-r, series 1, archival unit 265, sh. 10, sh. 14.
8. Filatov V. V. 2009, *Professora Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta* [Professors of the Ural State Mining University]: Who was Who, 4th ed., revised and updated. Ekaterinburg, 479 p.
9. Filatov V. V. 2011, Ural'skaya geofizicheskaya shkola (60 let geofizicheskomu fakul'tetu Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta. 1951–2011 [Ural Geophysical School (60 years of the geophysical department of the Ural State Mining University. 1951–2011)]: Who was Who, 2d ed., revised and updated. Ekaterinburg, 461 p.

*Статья поступила в редакцию 16 декабря 2018 г.*

# Уважаемые авторы!

Журнал «Известия УГГУ» публикует результаты научных исследований российских и зарубежных авторов на русском или английском языках.

К рассмотрению принимаются рукописи, снабженные следующими необходимыми компонентами.

**1. Текст статьи на русском или английском языке (либо двуязычный) в электронном виде.** Статьи принимаются на электронную почту редакции: **iuggu-journal@yandex.ru** либо при помощи электронной редакции на сайте iuggu.ru. Не допускается направление в редакцию статей, уже публиковавшихся или посланных на публикацию в другие журналы. Необходимо указывать номер УДК.

**2. Аннотация и ключевые слова.** Объем аннотации должен составлять 200–250 слов, ключевых слов должно быть не менее 5. По аннотации читатель должен определить, стоит ли обращаться к полному тексту статьи для получения более подробной, интересующей его информации. Стоит воздержаться от второстепенной информации и выражать мысли возможно более лаконично.

**В аннотации должны быть четко прописаны: актуальность, цель работы, метод или методология проведения работы, результаты работы и область их применения; выводы (при необходимости).**

**Текст статьи должен быть структурирован в соответствии с аннотацией и содержать конкретные разделы: введение, результаты и их применение, выводы (при необходимости), заключение.**

Перевод аннотации, ключевых слов и списка литературы на английский язык осуществляется авторами, только если они уверены в качестве перевода, если же нет – перевод осуществляется редакцией. Перевод с помощью электронных переводчиков не принимается.

**3. Список литературы** на русском и английском языках. Ссылки на источники должны идти в тексте по порядку – 1, 2, 3. В тексте ссылки заключаются в квадратные скобки. Количество ссылок в тексте должно соответствовать количеству источников литературы в списке. Упоминания ГОСТ, СНиП, правил безопасности, нормативных, законодательных и других документов, отчетов о НИР, а также ссылок на неофициальные источники в Интернет необходимо приводить в тексте статьи или в сносках, не вынося в список литературы. Обязательно отражение в статье мирового опыта по рассматриваемому вопросу, список литературы должен содержать современные зарубежные статьи (не ранее 2013 года издания). Список литературы должен содержать не менее 15 источников, из которых должно быть не более 2 собственных работ автора. Наличие в списке литературы учебников, учебных и методических пособий, указаний по курсовому и дипломному проектированию, конспектов лекций для студентов не допускается.

При оформлении списка литературы у ВСЕХ публикаций, имеющих DOI (особенно это касается иностранных публикаций), эти DOI должны быть указаны (в виде гиперссылок). Пример оформления: 10. Henry D.J., Novák M., Hawthorne F.C., Ertl A., Dutrow B.L., Uher P., Pezzotta F. Nomenclature of the tourmaline-supergroup minerals // American Mineralogist, 2011. Vol. 96. P. 895-913. https://doi.org/10.2138/am.2011.3636. Ссылки должны быть работающие!

**4. Сведения об авторах.** Необходимо указать для каждого автора на русском и английском языках ФИО, должность, ученую степень и звание, место работы (учебы) с указанием полного почтового адреса, контактный e-mail, контактный телефон, номер ORCID ID (аккаунт ORCID обязательно должен содержать информацию о месте работы автора и актуализированный перечень публикаций).

**5. Экспертное заключение о возможности опубликования.** В сканированном или распечатанном виде.

**6. Согласие на обработку персональных данных.** Можно как прислать в сканированном виде, так и принести в редакцию. Бланк можно взять в редакции.

Плата за публикацию с авторов научно-технических статей, включая аспирантов, в порядке общей очереди не взимается.

**Оформление статей**

1. Редактор Microsoft Word, гарнитура Minion Pro. Поля документа: левое 2 см, остальные – 1,5 см. Кегль 10, одинарный интервал. Абзацный отступ 0,63. Страницы нумеруются. Не допускаются пробелы между абзацами.
2. В тексте допускаются только общепринятые сокращения слов. Все сокращения в тексте, рисунках, таблицах должны быть расшифрованы.
3. Формулы должны быть набраны в редакторе Microsoft Equation и пронумерованы, если в тексте имеются ссылки на них. При наборе формул и текста латинские буквы выделяют курсивом, а русские, греческие и цифры – прямым шрифтом. Кегль шрифта в формулах должен совпадать с кеглем шрифта основного текста. Тригонометрические знаки (sin, cos, tg, arcsin и т. д.), знаки гиперболических функций (sh, ch, th, cth и т. д.), обозначения химических элементов (Al, Cu, Na и т. д.), некоторые математические термины (lim, In, arg, grad, const и т. д.), числа или критерии (Re – Рейнольдса и т. д.), названия температурных шкал (°C – градусы Цельсия и т. д.) набираются прямым шрифтом.
4. Физические единицы приводятся в системе СИ.

**Графический материал**

Рисунки, карты, чертежи предоставляются в электронном и бумажном виде, в цветном и/или черно-белом исполнении. Изображения должны быть четкими, контрастными. Таблицы и схемы должны быть пригодными для правки. Таблицы и схемы, сканированные как изображения, не принимаются.

На картах обязательно указывается масштаб. На чертежах, разрезах, картах должно быть отражено минимальное количество буквенных и цифровых обозначений, а их объяснение – в подрисуночных подписях. Ксерокопии и сканированные ксерокопии фотографий не принимаются. Рисунки с нечитаемыми или плохо читаемыми надписями, с подписями «от руки», слишком тонкими линиями не принимаются.

Подрисуночная подпись должна быть набрана 8 кеглем, основной текст в таблице – 8 кеглем, шапка таблицы – 8 кеглем. Гарнитура текста в рисунках и таблицах – Arial, кегль 8.

Все статьи подлежат двойному слепому рецензированию, мнение рецензента всегда доводится до сведения автора.

**Примеры оформления списка литературы**

*Монографии*

Исимару А. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. М.: Мир, 1981. 280 с.

*Статьи в периодических изданиях*

Абатурова И. В., Грязнов О. Н. Инженерно-геологические условия месторождений Урала в скальных массивах // Изв. вузов. Горный журнал. 2014. № 6. С. 160–168.

*Авторефераты, диссертации*

Овечкина О. Н. Оценка и прогноз изменения состояния геологической среды при техногенном воздействии зданий высотной конструкции в пределах города Екатеринбурга: автореф. … дис. канд. геол.-минерал. наук. Екатеринбург: УГГУ, 2013. 24 с.

Сушко А. Е. Разработка специального математического и программного обеспечения для автоматизированной диагностики сложных систем: дис. … канд. техн. наук. М.: МИФИ, 2007. 170 с.

*Зарубежные исследования*

Hudson J. A. The Scattering of Elastic Waves by Granular Media. Quart Journal Mech. and Applies Math. 1968. Vol. XXI. Pt. 4. pp. 487–502.

*Сетевые источники*

Биржевой навигатор. URL: http://stock-list.ru/natural-gas.html

# Памятка для авторов

Научный журнал не может (и не должен) развиваться только силами редакции. Поэтому, предъявляя новые требования к себе, мы предъявляем их и к авторам, которые хотят публиковаться в нашем журнале.

Требования к оформлению высылаемых рукописей мы публикуем на нашем сайте, а также на последней станице каждого нового выпуска. Здесь мы не будем повторять все это, лишь расскажем о нововведениях, которые нам представляются наиболее важными.

**Аннотация.** Как на русском, так и на английском языках аннотации сейчас принимаются только расширенные – не менее 200 слов. Делается это для того, чтобы читатель (в том числе иностранный) мог в считанные минуты понять, о чем данная статья и представляет ли она для него интерес.

**Список литературы.** К сожалению, публикации в советских журналах традиционно отличались от иностранных меньшим числом источников. Кроме того, отечественные ученые зачастую не утруждают себя изучением иностранных публикаций на интересующую тему. Также часты использования в качестве источников различных учебников, методичек и пр. Все это значительно снижает уровень публикаций. Поэтому мы взяли за правило рекомендовать авторам расширять список литературы до 10–15 источников с обязательным использованием современных зарубежных публикаций. Исключения возможны, но они должны быть обоснованными.

**DOI.** Помимо ставшего уже привычным для авторов присваиваемого каждой статье номера УДК, начиная со второго номера 2016 года каждой статье в обязательном порядке присваивается номер DOI.

DOI (*англ.* Digital object identifier) – классификатор цифрового объекта для создания постоянных гиперссылок, которые позволяют сохранять информацию о конкретной статье в сети Интернет, даже если изменилась структура сайта, где эта статья изначально была сохранена.

Проще говоря, номер DOI позволяет научной статье гарантированно открываться и быть доступной для поиска в сети, что совершенно необходимо для того, чтобы статья могла цитироваться с помощью Интернета, не затрудняя авторов поисками ее в библиотеках и архивах – своего рода дань современным IT-технологиям.

Редакцией «Известий УГГУ» заключен договор с Некоммерческим партнерством «Национальный Электронно-Информационный консорциум» (НП НЭИКОН), которое предоставляет в России посреднические услуги по присвоению DOI от регистрационного агентства (DOI Registration Agency) CrossRef. Это самый современный центр регистрации Международной организации документации, основной задачей которого является организация доступа пользователей к первичным публикациям, содержащим научный контент, и содействие коллективной работе издателей по всему миру. Эту кооперативную справочную систему сейчас используют большинство научных журналов в мире.

DOI обязательно указывается при цитировании статьи. В журнале «Известия УГГУ» DOI сейчас присваивается каждой вновь вышедшей статье. Также номер DOI может быть присвоен любой из статей, которые ранее публиковались в нашем журнале – но уже не в обязательном порядке, а по желанию авторов. Для желающих достаточно сделать заявку в редакцию.

**Качество перевода.** Нас не устраивает перевод аннотаций (и уж тем более – статей) с помощью электронных переводчиков. Если вы не уверены в своем переводе, лучше обратитесь за помощью в редакцию. Лучше не предоставить никакого перевода, чем перевод низкого качества.

**Качество рисунков.** Рисунок должен оставаться качественным при увеличении. Не забывайте о том, что статья будет опубликована не только в бумажной, но и в электронной версии.

**Качество текстов.** При рассмотрении рукописи авторитет и заслуги автора статьи во внимание не принимаются – только качество присланного текста. Для этого введено двойное слепое рецензирование.

**Слепое рецензирование.** Два рецензента оценивают качество статьи, не зная, кто ее автор. В случае, если рецензент узнает автора, то рукопись автоматически передается другому рецензенту – из числа экспертов, сотрудничающих с журналом. Делается это для того, чтобы личные отношения не влияли на качество рецензии. Автор также не знает своего рецензента.

Помимо этого, правила публикации текстов предполагают их разнообразие. Поэтому **недопустима публикация двух статей одного автора в одном номере журнала.** То же правило распространяется и на соседние номера. Так мы поддерживаем разнообразие тем и авторов, исключая превращение журнала в издание, где постоянно публикуется десяток одних и тех же авторов. Исключение составляют статьи вне научных разделов, а также статьи, продолжающиеся из номера в номер. В качестве альтернативы публикации в нашем журнале мы можем предложить автору опубликоваться в другом журнале, с которым у нас заключен договор по обмену статьями.

**Очередь.** Сроки публикации зависят от количества (и качества) статей, предложенных редакции. Если статей много, они публикуются в порядке очередности, однако редакция оставляет за собой право печатать вне очереди те из них, которые считает наиболее значимыми.

Автор должен также подписать согласие на использование редакцией журнала "Известия УГГУ" его персональных данных.

Известия Уральского государственного горного университета. 2019, вып. 1(53)
News of the Ural State Mining University. 2019, issue 1(53)

**На обложке:** фото святославита, моноклинного псевдоромбического аналога анортита – минерала, найденного в горелых отвалах Челябинского угольного бассейна (Южный Урал)

**On the cover:** the photo of svyatoslavite, a monoclinal pseudo-orthorhombic analogue of anorthite, the mineral found in burned dumps of Chelyabinsk Coal Basin (the South Urals).

## Редакция выражает благодарность за помощь в работе журнала

**Баранникову** Александру Григорьевичу – д-ру геол.-минерал. наук, профессору (Екатеринбург, Россия),
**Боярских** Геннадию Алексеевичу – д-ру техн. наук, профессору (Екатеринбург, Россия);
**Карстен** Луизе – Dr. rer. nat. (Ганновер, Германия);
**Кожушко** Герману Георгиевичу – д-ру техн. наук, профессору (Екатеринбург, Россия);
**Козину** Владимиру Зиновьевичу - д-ру техн. наук, профессору (Екатеринбург, Россия);
**Корнилкову** Сергею Викторовичу – д-ру техн. наук, профессору (Екатеринбург, Россия);
**Сурневу** Виктору Борисовичу – д-ру физ.-мат. наук, профессору (Екатеринбург, Россия);
**Тимухину** Сергею Андреевичу – д-ру техн. 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 Шорина Э. В.
Редактор Фишман Ю. П.
Переводчик Алферова А. М.

Верстка Шориной Э. В.
Корректура Пихтовниковой О. Г.
Идея обложки Васфиловой И. С.

Подписано в печать 15.03.2019. Дата выхода в свет – 20.03.2019.
Формат 60 × 84/8. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 22,1. Тираж 120 экз. Заказ № 18
Цена свободная

Почтовый адрес издателя и учредителя: 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30,
ФГБОУ ВО "Уральский государственный горный университет"
Редакция: 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30, к. 3142
Тел.: (343)283-05-60
E-mail: iuggu-journal@yandex.ru
https://iuggu.ru

Отпечатано в типографии "Для Вас":
620073, г. Екатеринбург, ул. Розы Люксембург, д. 52а, оф. 3