ISSN 2500-2414
ISSN 2307-2091
www.iuggu.ru

NEWS

OF THE URAL
STATE MINING
UNIVERSITY

Выпуск № 1 (73)
2024

ИЗВЕСТИЯ

УРАЛЬСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ГОРНОГО УНИВЕРСИТЕТА

Томъ I. (III-IV) 1918/19 ак. г. Volume I. (III-IV)

ИЗВѢСТІЯ
☆
УРАЛЬСКАГО ГОРНАГО ИНСТИТУТА
ВЪ
ЕКАТЕРИНБУРГѢ

☆

ANNALES
DE
L'ECOLE SUPÉRIEURE DES MINES DE L'OURAL
A ÉKATHÉRINEBOURG.

Подъ общей редакціей Засл. Проф. П. П. ф. Веймарна.
Sous la direction principale de Prof. émér. P. P. de Weimarn.

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 (73)

2024

Уральский государственный
горный университет

Известия Уральского государственного
горного университета
2024, вып. 1 (73)

Ural State
Mining University

News of the Ural State
Mining University
2024, issue 1 (73)

Журнал выходит 4 раза в год

Известия Уральского государственного горного университета – рецензируемый научно-технический журнал, в котором находят отражение актуальные вопросы изучения, оценки и промышленного освоения минерально-сырьевых ресурсов Уральского региона и сопредельных территорий. В их числе проблемы геологии и разведки недр, геофизических исследований, горного дела и горной механики, экономики природопользования.

К публикации принимаются статьи на русском и английском языках.

Полнотекстовая версия журнала размещается в свободном доступе на нашем сайте https://iuggu.ru, в системе журналов открытого доступа DOAJ и ROAD, а также на платформе Российского индекса научного цитирования (РИНЦ) НЭБ. Более полная информация и правила оформления статей размещены на сайте журнала.

Published 4 times a year

News of the Ural State Mining University is a peer-reviewed scientific and technical journal, which reflects topical issues of the study, evaluation and commercial development of mineral resources of the Ural region and adjacent territories. These include problems of geology and subsoil exploration, geophysical studies, mining and mining mechanics, environmental economics.

We accept for publication articles in Russian and English languages.

The full-text version of the journal is in the public domain on the website of the journal https://iuggu.ru, in DOAJ, ROAD and in the database of the Russian Science Citation Index of the Russian Universal Scientific Electronic Library.

Website of the journal contains a detailed information about the journal, as well as guidelines for authors.

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

Подписка на журнал осуществляется по каталогу «УП УРАЛ-ПРЕСС»
«Газеты. Журналы», подписной индекс 25145.

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

Известия Уральского государственного горного университета, 2024, вып. 1(73)
News of the Ural State Mining University, 2024, issue 1(73)

Учредитель и издатель

УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Главный редактор

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

Заместитель главного редактора

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

Ученый секретарь

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

Редакционная коллегия

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

Члены международной редколлегии

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

Известия Уральского государственного горного университета, 2024, вып. 1(73)
News of the Ural State Mining University, 2024, issue 1(73)

Founder and publisher

URAL STATE MINING UNIVERSITY

Editor-in-Chief

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

Deputy Editor-in-Chief

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

Academic Secretary

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

Editorial board

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

International members

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

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

Интеграция гравиметрических и скважинных данных для визуализации глубины и плотности трехмерной обратной модели глубинной структуры сложного фундамента, а также тектонических данных для дальнейшей разведки углеводородов в районе бассейна Эль-Зейт, юго-запад Суэцкого залива, Египет
А. Г. М. Хассан, К. С. И. Фараг, А. А. Ф. Ареф, А. Л. Пискарев
(In English)
7

Гео-петрофизический анализ углеводородов в бассейне Дуала-Кампо, Камерун
Б. Й. Тишуе, В. М. Усова, С. Нтех, Е. М. Котельникова
(In English)
33

Перспективы развития углеводородных месторождений в лавинно-осадочных телах Южно-Каспийского бассейна (ЮКБ)
Р. Я. Ганиева
(In English)
47

Амфиболы из хромититов рудопроявления Енгайское-1 массива Рай-Из (Полярный Урал)
П. Б. Ширяев, Н. В. Вахрушева
(In English)
53

О генезисе соляных структур Верхнекамского месторождения калийных солей
В. В. Филатов, Л. А. Болотнова
59

Критерии оценки сырьевой базы промышленного производства высокочистого кварца на основе анализа кварца Кыштымского месторождения и других действующих мировых производителей
Л. В. Кузьмин, В. Г. Кузьмин, Ю. А. Поленов
67

Ранние поперечные к слоистости кварцевые жилы в северной части Куларского района, Якутия: продольное укорочение жил и перекристаллизация кварца
О. А. Суставов
75

Применение спектроскопических методов для изучения и объяснения эффекта Усамбара
Р. Н. Зубов, А. Ю. Кисин
87

Исследования почвенно-растительного покрова в зоне влияния шлаковых отвалов черной металлургии
Е. С. Золотова
97

EARTH SCIENCES

Integration of gravity and well data for depth-density imagining of the 3D basement complex deep structure inverse model, along with tectonic insights for further hydrocarbon exploration at El Zeit basinal area, southwest Gulf of Suez, Egypt
A. G. M. Hassan, K. S. I. Farag, A. A. F. Aref, A. L. Piskarev
(In English)
7

Geo-petrophysical analysis of hydrocarbon in the Douala Campo basin, Cameroon
B. Y. Tichoue, V. M. Usova, S. Nteh, E. M. Kotel'nikova
(In English)
33

The prospects of hydrocarbon deposits in avalanche sedimentary bodies in the South Caspian Basin (SCB)
R. Ya. Ganieva
(In English)
47

Amphiboles from chromitites of the Yengaiskoye-1 ore occurence, Rai-Iz massif (Polar Urals)
P. B. Shiryaev, N. V. Vakhrusheva
(In English)
53

On the genesis of salt structures of the Verkhnekamsk potash salt deposit
V. V. Filatov, L. A. Bolotnova
59

Criteria for assessing the raw material base for the industrial production of high-purity quartz based on an analysis of quartz from the Kyshtym deposit and other existing global producers
L. V. Kuz'min, V. G. Kuz'min, Yu. A. Polenov
67

Early quartz veins transverse to bedding in the northern part of the Kular region, Yakutia: longitudinal shortening of the veins and recrystallization of quartz
O. A. Sustavov
75

Application of spectroscopic methods to study and interpretation of Usambara effect
R. N. Zubov, A. Yu. Kisin
87

Research of soil and vegetation cover in the zone of influence of slag dumps of ferrous metallurgy
E. S. Zolotova
97

Снижение рисков при разработке трудноизвлекаемых запасов жидких углеводородов с использованием комплексного анализа геолого-промысловых данных
Р. А. Гилязетдинов
106 **Risk reduction in the development of hard-to-recover liquid hydrocarbon reserves using a comprehensive analysis of geological and field data**
R. A. Gilyazetdinov

Анализ степени зарастания нарушенных при добыче стройматериалов земель в условиях степной зоны Монголии
Д. Батжаргал, Б. Л. Тальгамер, Б. Н. Олзоев, А. Ю. Болотнев
114 **Analysis of the degree of overgrowth of lands disturbed during the extraction of building materials in the steppe zone of Mongolia**
D. Batzhargal, B. L. Tal'gamer, B. N. Olzoev, A. Yu. Bolotnev

Анализ результата применения геотехногенного массива в сложных инженерно-геологических условиях города Екатеринбурга
О. Н. Овечкина
121 **Analysis of the result of using a geotechnogenic massif in complex engineering and geological conditions of the city of Ekaterinburg**
O. N. Ovechkina

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ
ECONOMIC SCIENCES

Решение проблемы отходов с позиции концептуальных положений по использованию природных ресурсов
М. Н. Игнатьева, И. В. Дроздова, О. Г. Комарова, И. В. Перегон
(In English)
137 **Solving the waste problem from the perspective of conceptual provisions of the use of natural resources**
M. N. Ignat'eva, I. V. Drozdova, O. G. Komarova, I. V. Peregon
(In English)

Трудовые коллективы: чем были вчера и чем стали сегодня
С. М. Абрамов, Ю. Н. Зеленов, Н. В. Зотеева
147 **Labor collectives: what were you yesterday and what have you become today**
S. M. Abramov, Yu. N. Zelenov, N. V. Zoteeva

Модель взаимодействия участников реализации проектов освоения ресурсов угольного метана
П. Н. Пармузин
153 **Model of interaction between participants in the implementation of projects for the development of coalbed methane resources**
P. N. Parmuzim

Эффективное управление минерально-сырьевой базой предприятий горнодобывающей отрасли как фактор экономической безопасности страны
С. М. Сальманов
164 **Effective management of the mineral resource base of mining enterprises as a factor in the economic security of the country**
S. M. Sal'manov

Современные тенденции управления энергоэффективностью посредством коммуникативного воздействия
И. Ю. Полетаев
172 **Modern trends in energy efficiency management through communicative influence**
I. Yu. Poletaev

ИСТОРИЯ ГОРНОГО ДЕЛА
HISTORY OF MINING

Аркадий Константинович Подногин (1898–1961) и бывший подногинит (ныне кальциооливин)
Ю. В. Ерохин, Л. М. Евдокимова, А. Г. Шорин
182 **Arkadiy Konstantinovich Podnogin (1898–1961) and former podnoginite (now calcio-olivine)**
Yu. V. Erokhin, L. M. Evdokimova, A. G. Shorin

Путь длиною в век: от лаборатории магнитометрии до кафедры геофизики Уральского государственного горного университета
Ж. Н. Александрова, Ю. В. Белышев, К. В. Вандышева, Т. А. Глушкова, Н. С. Земцов, И. Е. Шинкарюк
193 **A century-long journey: from the magnetometry laboratory to the department geophysics of the Ural State Mining University**
Zh. N. Aleksandrova, Yu. V. Belyshev, K. V. Vandysheva, T. A. Glushkova, N. S. Zemtsov, I. E. Shinkaruk

Науки о Земле
Earth sciences

UDC 550.3+550.839+550.8.056+550.8.053 http://doi.org/10.21440/2307-2091-2024-1-7-32

Integration of gravity and well data for depth-density imagining of the 3D basement complex deep structure inverse model, along with tectonic insights for further hydrocarbon exploration at El Zeit basinal area, southwest Gulf of Suez, Egypt

Ahmed Gamal Mohamed HASSAN[1,2*]
Karam Samir Ibrahim FARAG[3]
Alaa Ahmed Fahmi AREF[2]
Alexey Lazarevich PISKAREV[1]

[1]Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia
[2]Nuclear Materials Authority (NMA), Cairo, Egypt
[3]Ain shams University, Cairo, Egypt

Abstract

Relevance and purpose of the work. Salt diapirs within sedimentary strata have posed challenges in seismic interpretation within the study region, thereby impeding the construction of a comprehensive three-dimensional central basinal structure. The use of gravity data to investigate the basement fault block pattern underlying the sedimentary basin in the Gebel El-Zeit basin, located in Egypt's southwestern Gulf of Suez, is regarded as a highly recommended method for adding tectonic insights for exploring hydrocarbons in this region.

Research Methodology. The current study uses Bouguer gravity anomalies to incorporate the basement complex's lateral density model assumptions to determine the best three-dimensional basement depth for the area under consideration. The suggested methodology employs consecutive 3D spectral layered-earth inversion techniques. Various forward optimization methodologies and parameterization sequences were tested with the Oldenburg and other forward models, integrating varying constraint parameter assumptions to manage the inversion procedures.

Results and conclusions. The proposed three-stage gravity inversion scheme is intended to discover the optimal depth-density solution while minimizing computational data mismatch to the greatest extent possible. By identifying appropriate parameters for a 3D depth-density model solution, the current study applies statistical analysis to outline the relief of the basement and its complex lateral density distribution. With zero regional gravity offset and DC-shift, there was no mean error, allowing the lateral density model to be optimally constrained. Correlating depth data from multiple stratigraphic-control wells drilled in the inverted 3D basement model demonstrated the optimality of the basement relief in the studied area. The correlation analysis results demonstrate that the anticipated and measured depths best fit. This fitting means that the lateral density distribution of the basement complex is optimally assumed, resulting in a minimal computational depth error, revealing the high tectonics of the research area and high hydrocarbon entrapment potentiality.

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

Introduction

Gravitational anomalies inversely interact with sedimentary basin recovery, tectonic activity, and petroleum reserves. The source's depth, thickness, and shape make inferring the basement's undulating surface morphology from gravity data a nonlinear inverse issue. Different assumptions can lead to discrepancies in sedimentary basin basement depth. Forward Fast Fourier Transform (FFT) approximates undulating layers' gravitational or magnetic effects [1, 2].

The slab formula $g = 2\pi\gamma\Delta\rho t$ predicts sediment thickness at each gravity datum using only the gravitational constant g, density contrast $\Delta\rho$, and slab thickness t. nonlinearity was found using iterative modeling [3]. Subsequent papers increased the number of iterations, changed it to a density-depth function instead of a uniform density, and reassessed the fitting function.

Bott's iterative technique was modified by adjusting step sizes based on the model's observed-to-estimated gravity

✉ahmed.gamal_88@hotmail.com

anomalies [4]. A recent study showed that the convergence of the model can be accelerated by validating it through comparing the *L*2 norm of the residual vector with the previous iteration [3]. Drill hole gravity data, gamma-gamma density, and saturated and unsaturated sample densities supported the gravity hypothesis. Many authors have reported in their studies that the rate of density increase is highest at the surface, employing various mathematical models such as linear, quadratic, exponential, hyperbolic, and parabolic (e. g. [5–8]). The environment affects sediment density.

A recent study reported that there may be discrepancies between the density data and the density contrast function derived from density measurements taken at specific locations in a basin. This makes it difficult to build a depth-dependent density contrast [8]. Non-density contrast interpretation may benefit sedimentary basin gravity modeling.

The backward computing on the model's iteration field could yield the analytical solution for the gravity field of a two-dimensional polygonal body, three-dimensional rectangular prism, or complicated undulating layer [3]. Bott's technique avoids matrix multiplications and inversions, speeding up Fourier-domain operations compared to space-domain operations. Analytical formulations for polyhedral and prismatic bodies with linear density contrast functions and parabolic or cubic polynomial functions have been developed–algorithms model vertical density contrast fluctuation with depth. Several authors in their studies have documented that these approaches use an exponential or cubic polynomial fitting

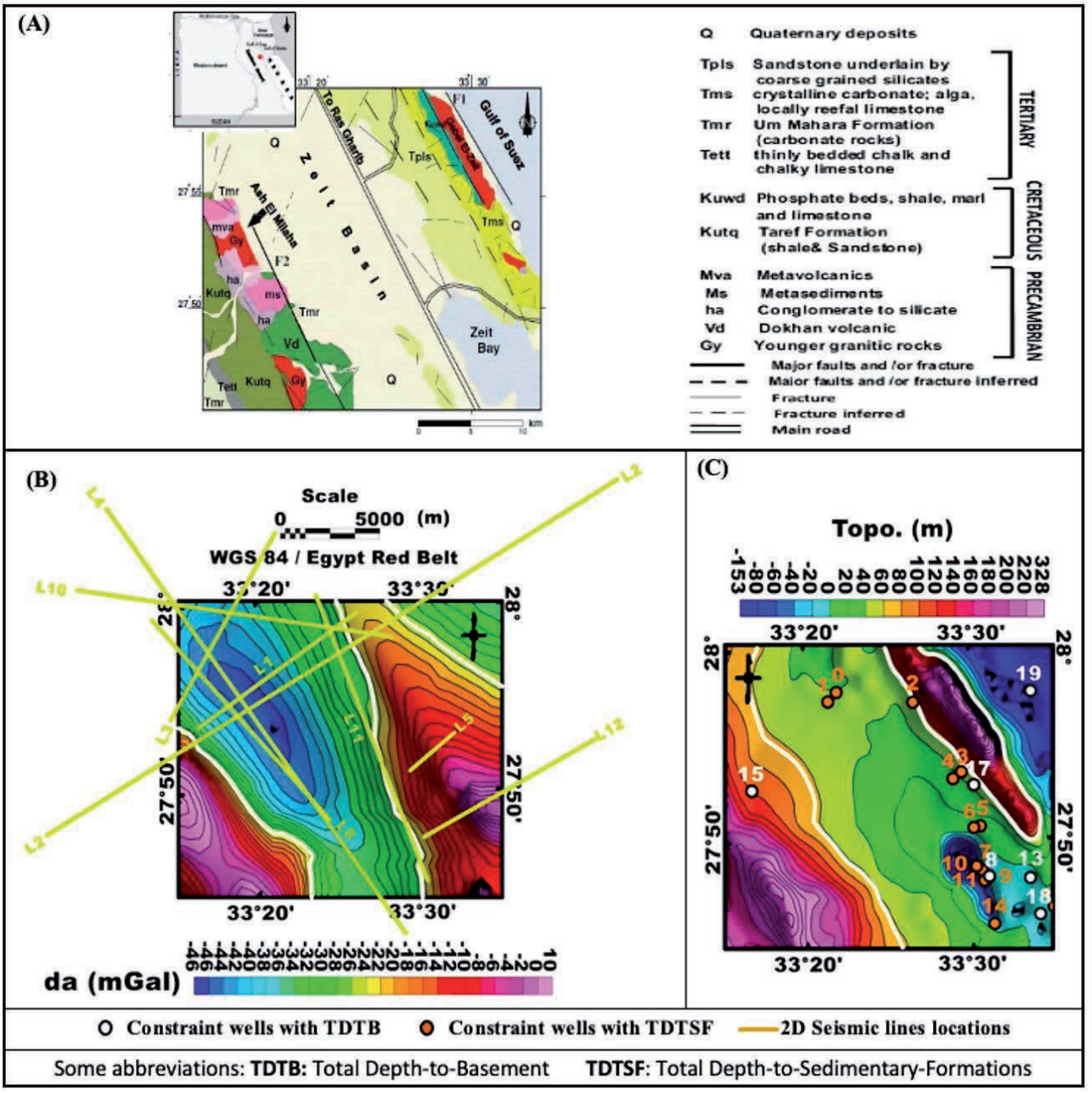


Figure 1.1. The bouguer gravity data and geological background: *A* – surface geological map [33], *B* – Bouguer anomaly contour map, *C* – Topographic map

Рисунок 1.1. Данные гравиметрии Буге и геологические предпосылки: *А* – геологическая карта поверхности [33], *Б* – контурная карта аномалии Буге, *С* – топографическая карта

Table 1. Both accessible and inaccessible total depth-to-basement constraint wells were used to set constraints on the proposed inversion scheme's inverse depth model and assess its quality [34, 35]
Таблица 1. Как доступные, так и недоступные скважины с ограничением общей глубины до фундамента, которые использовались для установки ограничений на обратную глубинную модель предлагаемой схемы инверсии и оценки ее качества [34, 35]

Well symbol	Well Name	Total Drilled Depth, m	Company	Status
1st group / wells with T.D Reached Rock Unit ***[Basement] @ geologic age/Pre-Cambrian***				
*W*8	C9A–1	2577	Conco	Abandoned tested oil and gas
*W*13	QQ89–11	1129	DEOCO	Abandoned
*W*15	Wadi Dib #1	3769	CHEV EGY	Abandoned
*W*17	Gazwarina # 1	2162	Marathon	Suspended oil
*W*18	QQ89–3	2908	SUCO	Abandoned
*W*19	ERDMA–2	4051	Published [36]	
2nd group / wells with T.D Reached Rock Unit ***[Nubia Sandstone (Nu)] @ geologic age/Carboniferous-Jurassic***				
*W*2	Kabrite west-1	1272	Petrozeit	Abandoned oil stain
*W*3	Gazwarina-2	1272	Marathon	Abandoned oil shows
*W*5	Gebel El Zeit-west-1	1966	Deminex	Abandoned
*W*6	Gebel El Zeit-west-2	2195	Deminex	Abandoned
*W*11	East Ras Gemsa-4	2542	Gupco	Abandoned gas shows
3rd group / wells with T.D Reached Rock Unit ***[Matulla Formation (Ma)] @ geologic age/Upper Cretaceous***				
*W*9	Khalig El Zeit-1	2509	Devon	Abandoned
*W*10	East Ras Gemsa-2	2538	Gupco	Abandoned
*W*16	Zeit Bay 1	4452	CHEV EGY	Abandoned
4th group / wells with T.D Reached Rock Unit ***[Nukhul Formation (Nuk)] @ geologic age/Lower Miocene***				
*W*0	Gebel El Zeit-2	3743	GPC	Abandoned
5th group / wells with T.D Reached Rock Unit ***[Rudies Formation (Ru)] @ geologic age/Lower Miocene***				
*W*1	Ramadan-1	3760	GPC	Abandoned oil and gas shows
*W*4	Gazwarina-3	951	Marathon	Abandoned
*W*7	C9A-3	2122	Conoco	Abandoned
*W*14	C9B-1	3183	Conoco	Abandoned

function (e. g. [6, 9–11, 12]). A recent study demonstrated in its review that Bott's method was employed to evaluate the gravitational impact of the increasing density of the basement and suggested solutions for reducing it [13]. Yucca Flat Basin isostatic anomalies have been examined in Nevada.

The basement geometry in the interpretation of gravity data is estimated using the Tikhonov's regularized inversion method [14]. Converting subsurface columns into prisms with known horizontal dimensions and densities allows the calculation of column thickness. The *L*2 norm of the discrete first-order derivative of the model goal function helps regularize the solution. The *L*1 norm of the discrete derivative total variation function is used to avoid penalizing quick morphological changes during basement depth inversion [15]. Nonlinear inversion smooths and blocks the model [16]. Density contrast splits the research region into smooth and blocky inversions. *Lp* model norm decreases after final inversion.

A composite regularizing function adjusts model smoothness in the target region to minimize an objective function [17]. Edge detection or initial approximation models identify gravitational anomalies. Using nonlinear modeling, estimation of basement morphology and constant density contrast [18]. Modeling sedimentary basins might execute without basement estimators [19, 20]. Objective function stabilizers affect fundamental characteristics, regularization parameters, and model parameter limits, making regularized inversion difficult.

Multiple basement depth measurements constrain ITRESC density depth or contrast function approximations. The ITRESC methods will be tested in the El Zeit basin in the southwest portion of Egypt's Gulf of Suez, then compared.

A prior information and geological setting. The African and Arabian tectonic plates diverged in the late Oligocene and early Miocene, forming the Gulf of Suez [21, 22]. Low-angle listric normal faulting and dyke injection caused the rift's eastward half-grabens [23]. Subsidence caused the middle to late Miocene asymmetric axial grabens to migrate eastward. Faulting and uplift found in the Esh El-Mallaha intra-rift structural block in the southern Gulf of Suez from the Pliocene to the Pleistocene/Holocene [24, 25]. Gebels El Zeit and Esh El-Mallaha have metamorphic, granitic, and Dokhan volcanic rocks on their eastern and western flanks [26].

As depicted in fig. 1.1, *A*, faults *F*1 and *F*2 run NW-SE in Quaternary alluvial wadis in the Gulf of Suez, juxtaposed with Precambrian bedrocks [27, 28]. Deep-seated tectonic faults make the Gemsa-El Zeit Bay Basin complicated. The geological composition of the area includes various formations such as the Nubian Sandstone, El Mallaha Formation, Raha Formation, Thebes Formation, Nukhul Formation, as well as the Lower/Middle Miocene Rudeis and Kareem layers. Additionally, the region features Sabkhas and salt marshes [25, 29–31]. Gravimetry can improve Earth model calculations by examining the potential field with indirect constraining of stratigraphic-control wells. Table 1 lists the wells.

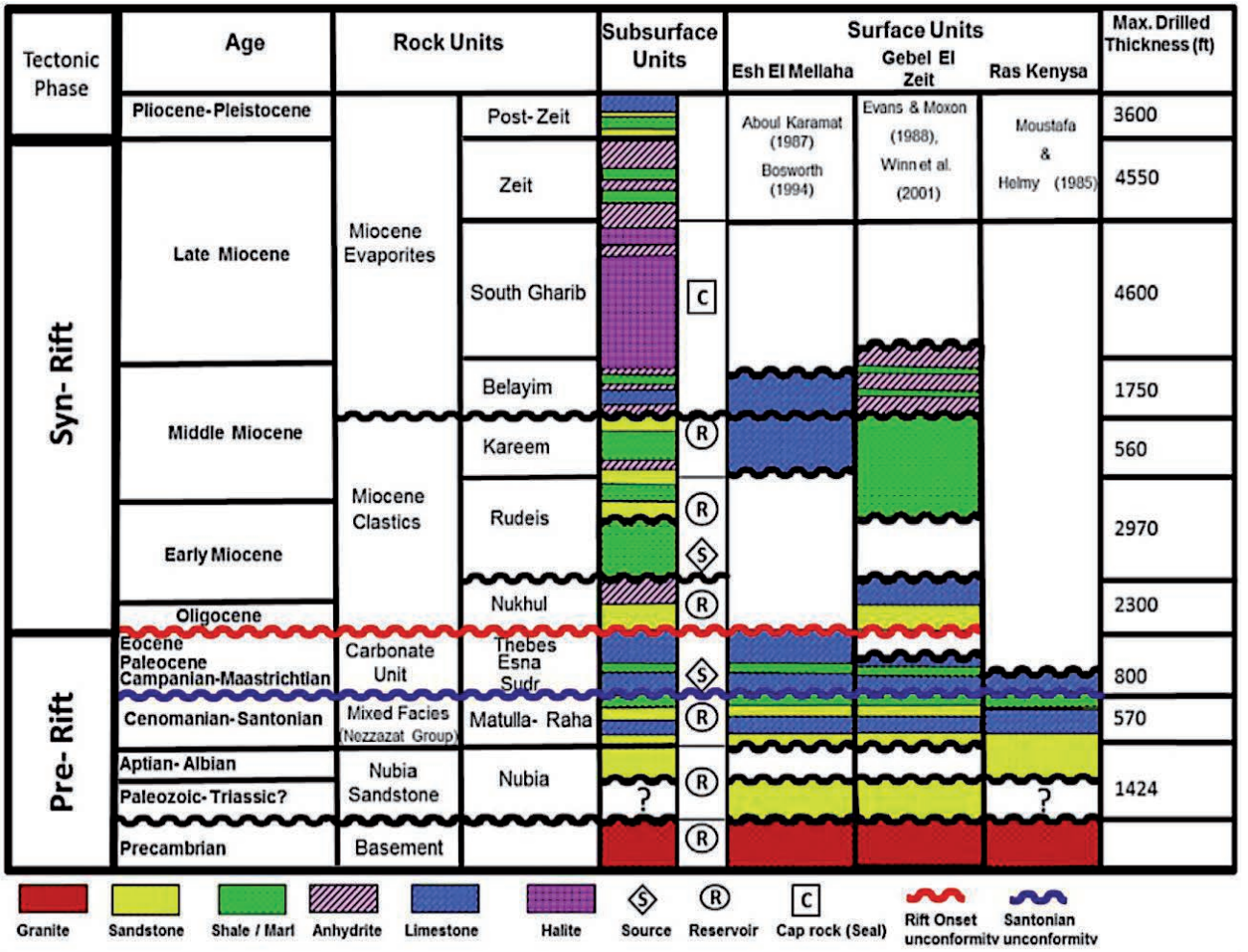


Figure 1.2. Stratigraphic geological column of southern Gulf of Suez revealing the lithology and classification of hydrocarbon potentiality at the study area of Gebel El Zeit [32]
Рисунок 1.2. Стратиграфическая геологическая колонка южной части Суэцкого залива, раскрывающая литологию и классификацию углеводородного потенциала на изучаемом участке Гебель-эль-Зейт [32]

Bouguer gravity data. The investigation used a 0.01 mGal resolution Lacoste and Worden gravimeter (Scintrex Inc., USA). The Bureau Gravimetric International (BGI) in Paris authorized the General Petroleum Corporation of Egypt (GPC) to create a gravity map of Egypt over ten years (1974–1984). A nationwide base net was created to supplement foreign company surveys. The Egyptian Academy of Scientific Research and Technology oversaw it. Re-measuring ensured precision. The raw data were exported in *x*, *y*, and *z* dimensions and gridded at 1000 m.

Figure 1, *B* shows the research region contour map colored by Bouguer anomalies. It is concluded, as seen in fig. 1.1, *A*, *B*, *C*, that Gebel El Zeit and Esh El-Mallaha have intricate basement outcrops east and west of Gemsa-El Zeit Bay, spanning a large sedimentary basin in the central region. Dual western gravity highs suggest local transmission faults at Gebel Esh El-Mallaha. Fig. 1.2 reveals the stratigraphic geological column of the southern Gulf of Suez, showing the lithology and classification of hydrocarbon potentiality at the Gebel El Zeit study area [32].

Inversion methodology

General Outline. Douglas Oldenburg's approach and others were used within the proposed three-stage inversion scheme to quantify El-Zeit basin geologic attributes in the study area. Geosoft Inc. in Toronto, ON, Canada's Oasis Montaj program's GM-SYS 3D extension sub-routine uses a popular spectral layered-earth inversion method for data reduction and filtering to help in the optimization. This method appropriately helps determine the study area's sedimentary-basement layer average density, density contrast, basement depths, and sedimentary section thickness. Oldenburg's inversion results were compared to other approaches to determine Oldenburg's constraint parameters' possibility of providing the most precisely resolved inverse model.

The proposed inversion scheme derives optimal initial and inverse models using a simple forward model and six optimization strategies with three forward and three inverse modeling scenarios in an attempt to save time and effort. Fig. 2.1, with its legend in fig. 2.2, depicts the parameterization flowchart for the proposed scheme's forward and inverse modeling processes with their three stages. (Tables 2.1; 2.2) describe all parameterization abbreviations used in our study.

Stages of the Scheme. In the initial stage, three optimization strategies were proposed: one for forward depth modeling with an unconstrained initial forward constant

Table 2. Abbreviations and classification of the parameters used to parameterize the forward and inverse models in our inversion scheme

Таблица 2. Сокращения и классификация параметров, используемых для параметризации прямой и обратной моделей в нашей схеме инверсии

Used for …	Parameter	Definition
Parameterization of root-mean-square and coefficient of variance	$(RMSD)_{ZoA \text{ or } oB1 \text{ or } oB2}$	The initial-guessed depth-to-basement root-mean-square deviation
	$(RMSD)_{ZeA \text{ or } eB1 \text{ or } eB2}$	The inverse-estimated-recovered depth-to-basement root-mean-square deviation
	$(CV-RMSD)_{ZoA \text{ or } oB1 \text{ or } oB2}$	Coefficient of variation of the initial-hypothesized depth-to-basement's root-mean-square deviation
	$(CV-RMSD)_{ZeA \text{ or } eB1 \text{ or } eB2}$	Coefficient of variation of the inverse-estimated-recovered depth-to-basement's root-mean-square deviation
	$(CV-RMSD)_{\rho boA \text{ or } oB1 \text{ or } oB2}$	Coefficient of variation of the initial-hypothesized homogenous basement complex's density's root-mean-square deviation
	$(CV-RMSD)_{\rho beA \text{ or } eB1 \text{ or } eB2}$	Coefficient of variation of the inverse-estimated-recovered homogenous basement complex's density's root-mean-square deviation
	$(CV-RMSD)_{LDDboA \text{ or } oB1 \text{ or } oB2}$	Coefficient of variation of the initial-hypothesized basement complex's lateral density distribution's root-mean-square deviation
	$(CV-RMSD)_{LDDbeA \text{ or } eB1 \text{ or } eB2}$	Coefficient of variation of the inversely-estimated recovered basement complex's lateral density distribution's root-mean-square deviation
Parameterization of depth and density model	$(DTB)a$	Actual-measured depth-to-basement
	$(DTB)_{oA \text{ or } oB1 \text{ or } oB2}$	Initial-hypothesized depth-to-basement
	$(DTB)_{eA \text{ or } eB1 \text{ or } eB2}$	Inverse-estimated depth-to-basement
	$(pB)_{oA \text{ or } oB1 \text{ or } oB2}$	Initial-hypothesized basement complex's homogenous density
	$(pB)_{eA \text{ or } eB1 \text{ or } eB2}$	Inverse-estimated-recovered basement complex's homogenous density
	$(LDDb)_{oA \text{ or } oB1 \text{ or } oB2}$	Initial-hypothesized basement complex's lateral density distribution
	$(LDDb)_{eA \text{ or } eB1 \text{ or } eB2}$	Inverse-estimated-recovered basement complex's lateral density distribution
Parameterization of density contrast model	$\Delta\rho\ (\rho b-\rho s)_{oA \text{ or } oB1 \text{ or } oB2}$	Initial-hypothesized sedimentary-basement's homogenous density contrast interface
	$\Delta\rho\ (\rho b-\rho s)_{oA \text{ or } oB1 \text{ or } oB2}$	Inverse-estimated-recovered sedimentary-basement's homogenous density contrast interface
	$\Delta\rho\ (LDDb-\rho s)_{oA \text{ or } oB1 \text{ or } oB2}$	Initial-hypothesized sedimentary-basement's lateral density contrast interface distribution
	$\Delta\rho\ (LDDb-\rho s)_{eA \text{ or } eB1 \text{ or } eB2}$	Inversely-estimated-recovered sedimentary-basement's lateral density contrast interface distribution
Parameterization of Inversion process constraint parameters	$(DC \text{ shift})_{eA \text{ or } eB1 \text{ or } eB2}$	DC shift
	$(Reg.offset)_{oA \text{ or } oB1 \text{ or } oB2}$	Regional offset
	$(Cnv.limit)_{eA \text{ or } eB1 \text{ or } eB2}$	Convergence limit
	$(Flt.LHC\ Limit)_{eA \text{ or } eB1 \text{ or } eB2}$	Lower high cut limit Filter
	$(Flt.UHC\ Limit)_{eA \text{ or } eB1 \text{ or } eB2}$	Upper high cut limit Filter
Parameterization of data and data misfit	$(d)_a$	Actual-observed Bouguer gravity data
	$(d)_{oA \text{ or } oB1 \text{ or } oB2}$	Initial-hypothesized Bouguer gravity data
	$(d)_{eA \text{ or } eB1 \text{ or } eB2}$	Inverse-estimated Bouguer gravity data
	$(\Delta d)_{eA \text{ or } eB1 \text{ or } eB2}$	Residual bouguer gravity as an indicator for inverse-estimated-recovered data misfit

Note: The abbreviations *A*, *B*1, and *B*2 are used to represent the three stages of parameterization. These parameters mentioned in tables 2.1 and 2.2 are initialized and estimated once for model *A* (representing the first stage of parameterization), again for model *B*1 (representing the second stage of parameterization), and finally for model *B*2 (representing the third stage of parameterization).

mean depth surface, another for forward density modeling with initial forward density constraint assumptions of a 3D homogeneous two-layered density model, and a third for depth inverse modeling that combines both strategies to recover Oldenburg's model with minimal error.

In the second stage, three other optimization strategies were proposed. The paper suggests three depth and density modeling strategies: forward depth modeling, forward density modeling, and density inverse modeling. The first strategy entails utilizing an initial depth surface to make depth predictions with variable errors, gradually decreasing errors with each guess. The second strategy limits density contrast guesses by laterally splitting density contrast estimates into homogenous-heterogenous two-layered density models. The third strategy combines the second stage's two above-mentioned forward strategies to find the best inverse-density solutions possible.

The third final stage employed three additional optimization strategies: one for forward depth modeling, which employs an unconstrained version of the forward variable depth constraint assumptions derived from trials of inverted 3D possible depth models with varying depth calculation errors; another for forward density modeling, which employs the constrained version of the second stage's inverted lateral density possible

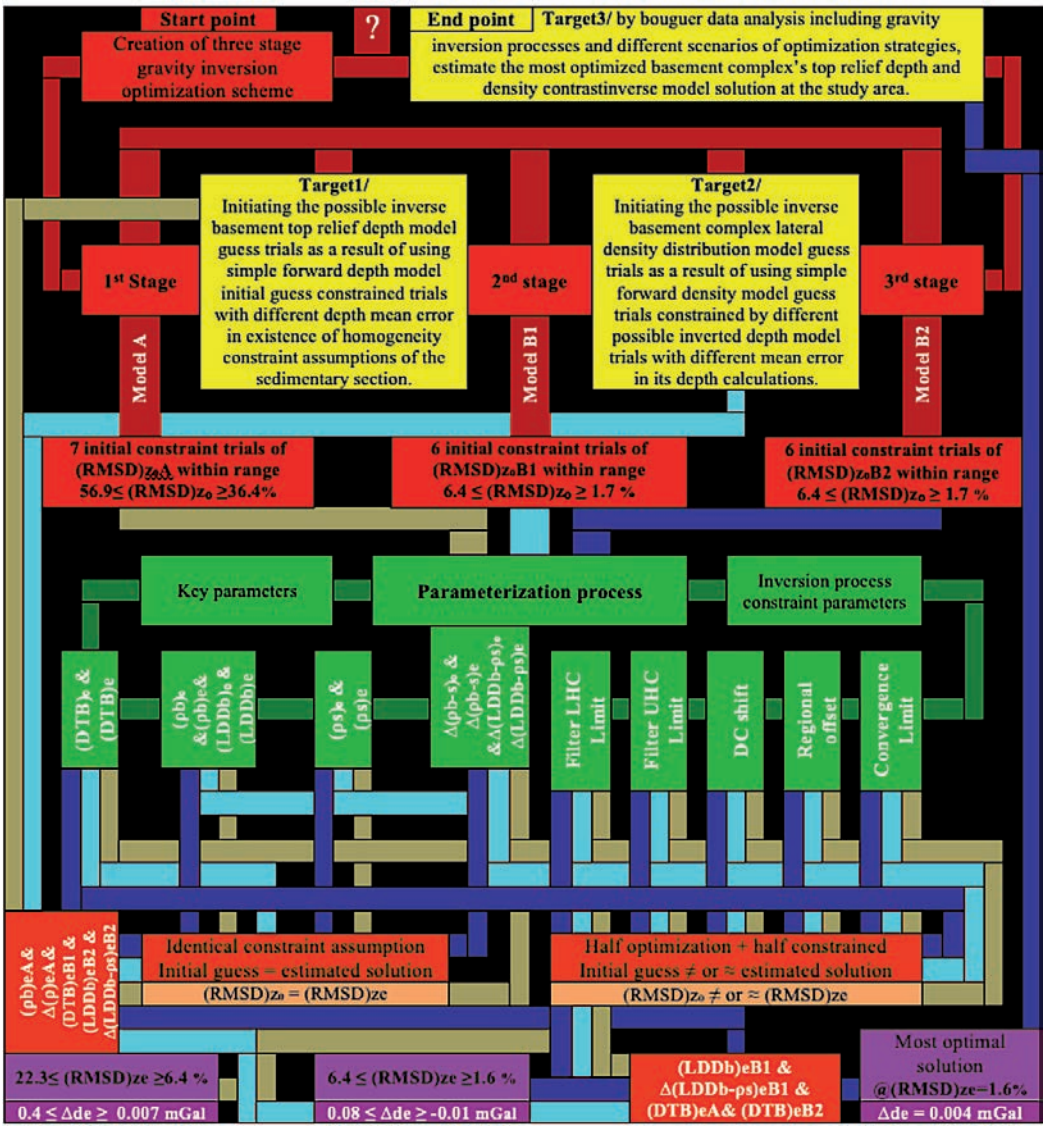


Figure 2.1. The flowchart for the three-stage inversion scheme utilized in this study includes optimization scenarios performed at each stage and between stages. Table 2 has a comprehensive list of abbreviations. Fig. 2.2 depicts a legend for this flowchart colorization
Рисунок 2.1. Блок-схема трехэтапной схемы инверсии, используемой в этом исследовании, включает сценарии оптимизации, выполняемые на каждом этапе и между этапами. В табл. 2 приведен полный список сокращений. На рис. 2.2 изображена легенда для цветовых обозначений данной блок-схемы

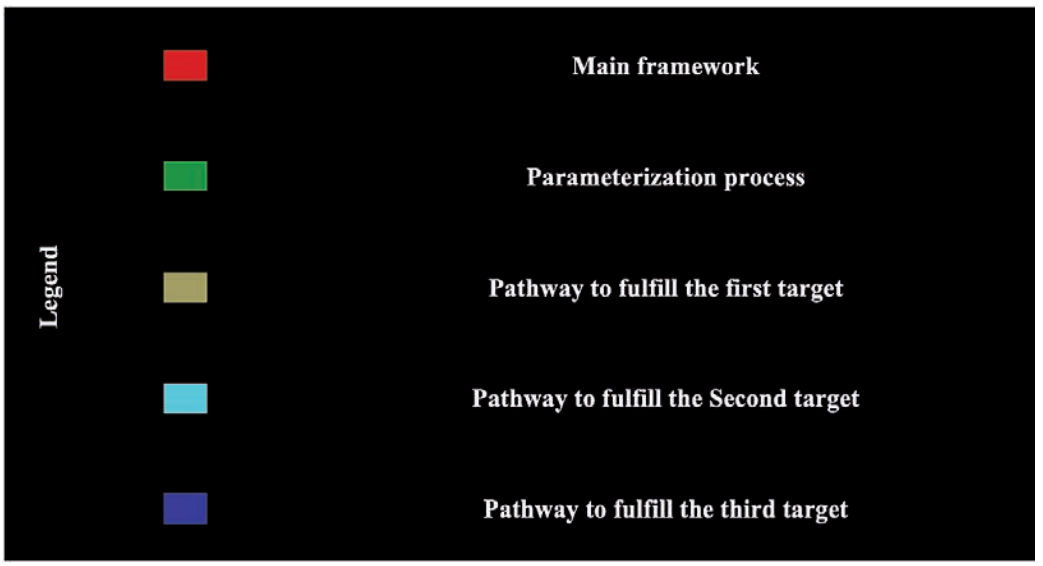


Figure 2.2. The legend for the proposed inversion scheme flow chart shown in fig. 2.1
Рисунок 2.2. Легенда к предлагаемой блок-схеме инверсии, представленной на рис. 2.1

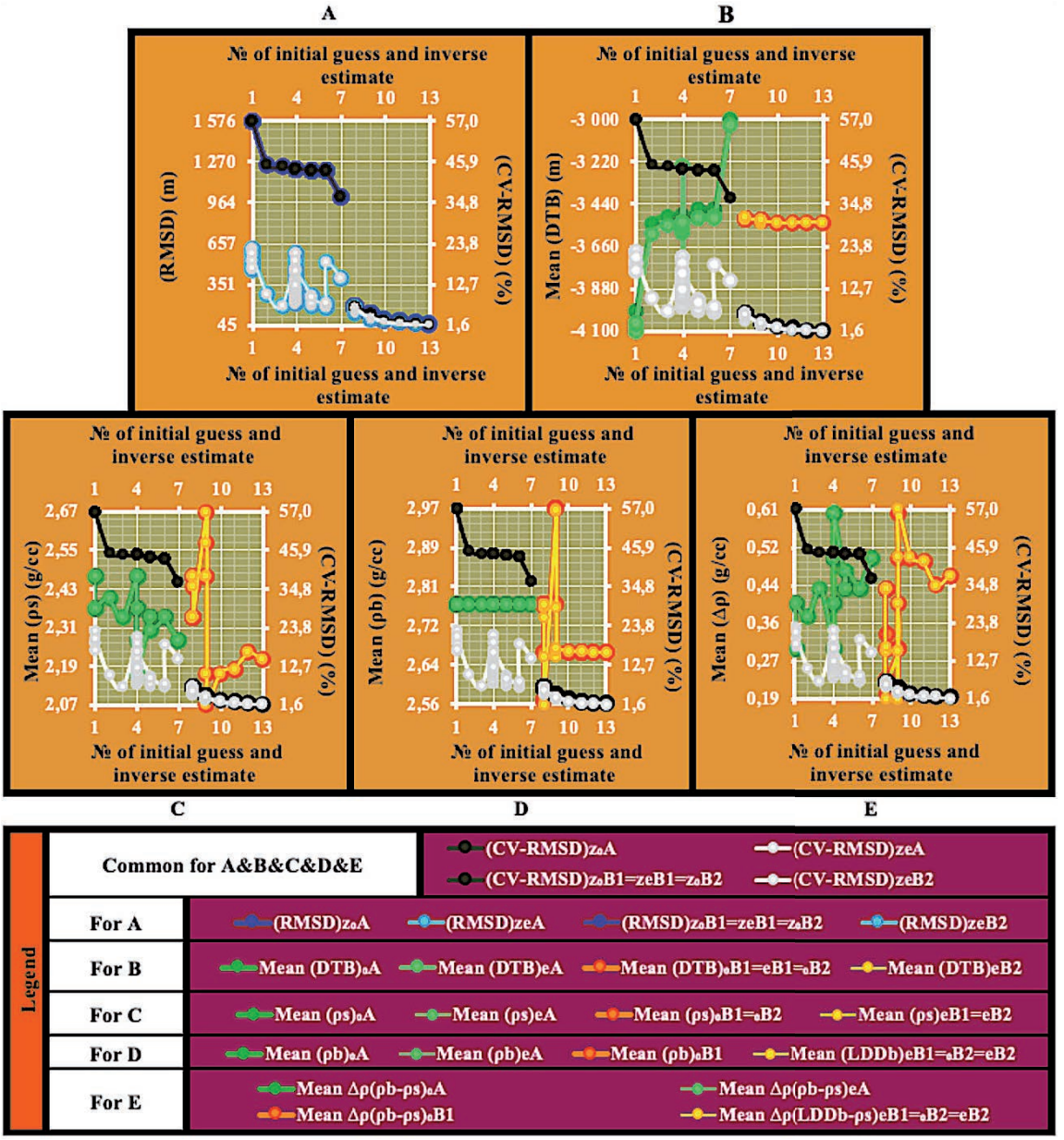


Figure 3.1. The three-stage optimization procedure for forward and inverse parameters guesses and recovers basement depth-density and basement-sedimentary interface density contrast models from five graphs with a root-mean-square coefficient of variance of 1.62% at the thirteenth trial. The abbreviations in tables 2.1 and 2.2

Рисунок 3.1. Трехэтапная процедура оптимизации для прямых и обратных параметров, которая угадывает и восстанавливает модели плотности глубины фундамента и контрастной плотности границы раздела фундамент–осадочные породы из пяти графиков со среднеквадратичным коэффициентом дисперсии 1,62 % в тринадцатой пробе. Сокращения в табл. 2.1 и 2.2

models; and a third for inverse depth modeling. During the second and third rounds of the suggested inversion process, the low error was achieved through iterative refinement of depth-density model solutions within the density contrast constrained-unconstrained optimization framework.

Results and discussion

A Comparison of the best-possible models in three stages. Three minimal-error inverse models were constructed from the three best forward models, representing the optimal result of the proposed three-stage inversion scheme. (Figs 3.1, 3.2, 3.3, 3.4) demonstrate how mean depth error guessing trials limited these. Each stage creates forward models and inverse solutions using distinct strategies. The assessment of inversion findings in the research region and individual sites showed the model's capacity to reduce computation inaccuracies and ensure dependability.

Optimal parameterization sequences, including first-stage parameters, started with 43.6% inaccuracy, the forward models with initial values Z_0 –3470 m, ρb_0 2.77 g/cc, ρs_0 2.34 g/cc, $\Delta\rho(\rho b{-}\rho s)_0$ 0.43 g/cc, Δd_0 37.65 mGal, *DC* shift 37.652 mGal, filter LHC limit 14000 m, filter UHC limit 7500 m, convergence limit 0.01 mGal, and regional offset 0 mGal. These inputs started forward modeling with 43.6% inaccuracy. The second stage included these forward parameters: Z_0 –3536 m, ρb_0 2.67 g/cc, ρs_0 2.21 g/cc, $\Delta\rho(\rho b - \rho s)_0$ 0.46 g/cc, Δd_0 42.661 mGal, *DC* shift 42.661 mGal, filter LHC limit 10000 m, filter UHC limit 9600 m, convergence limit 0.0054 mGal, and regional offset 0 mGal. Forward modeling guessing,

in this case, decreased to 1.78% inaccurate. The third stage finally initiated with these initial parameters: Z_0 –3536 m, $LDDb_0$ 2.6706 g/cc, ρs_0 2.21 g/cc, $\Delta\rho(LDDb–\rho s)_0$ 0.4606 g/cc, Δd_0 42.670 mGal, *DC* shift 42.670 mGal, filter LHC limit 20000 m, filter UHC limit 15 000 m, convergence limit 0.0001 mGal, and regional offset 0 mGal, constrained with the 1.78% forward modeling guessing inaccurate.

The parameters estimated with 6.4 % inaccuracy recovered the optimal first-stage inverse model with these parameters: *Ze* –3513 m, ρbe 2.77 g/cc, ρse 2.34 g/cc, $\Delta\rho(\rho b–\rho s)e$ 0.43 g/cc, Δde 0.0506 mGal, *DC* shift 37.652 mGal, filter LHC limit 14000 m, filter UHC limit 7500 m, convergence limit 0.01 mGal, and regional offset 0 mGal. The optimal 1.78%

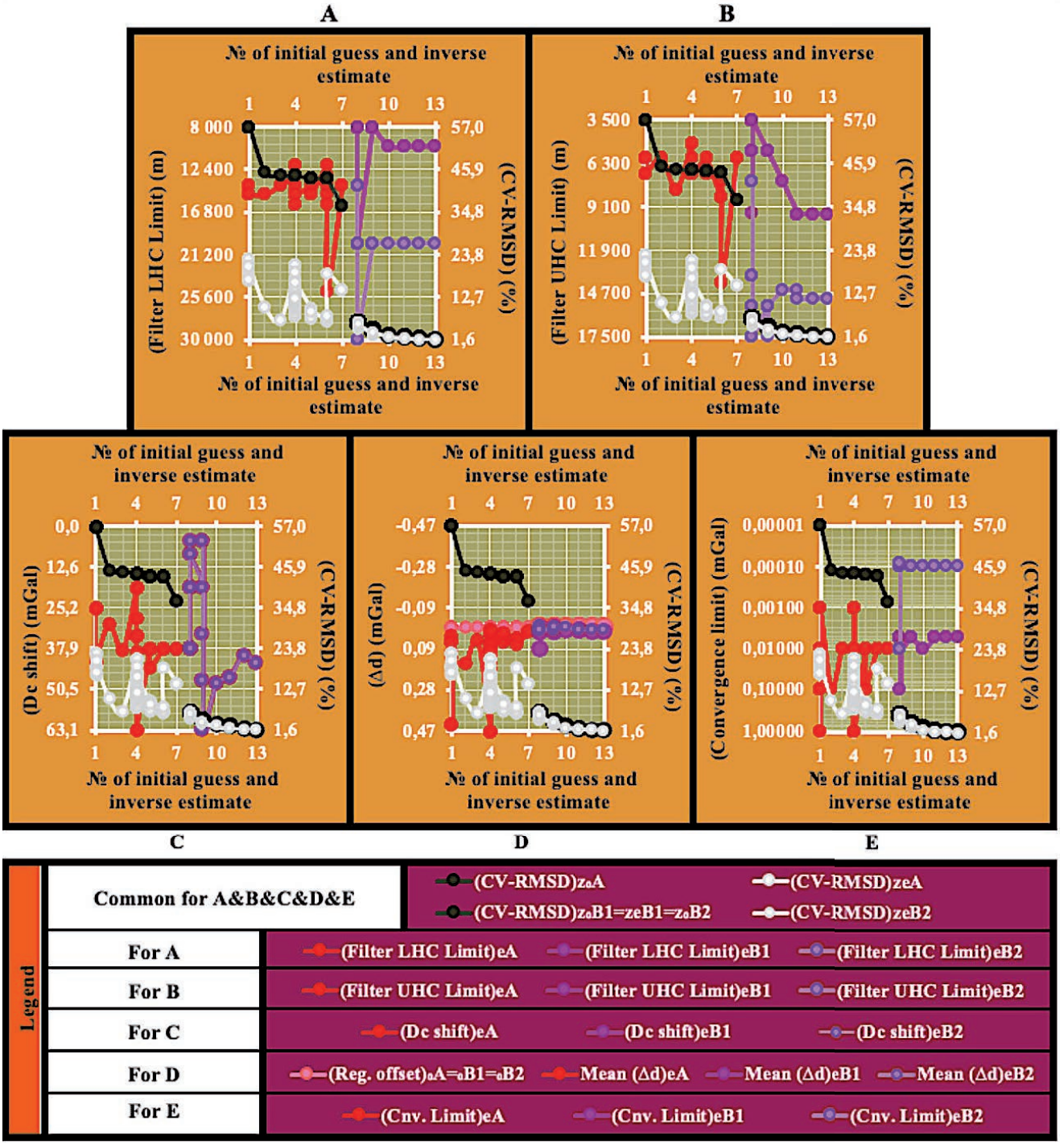


Figure 3.2. The parameterization expressed across five graphs shows that the proposed inversion scheme used a three-stage optimization process for six inversion process inner constraint parameters to provide the optimal solution with a root-mean-square coefficient of variance of only 1.62% after thirteen trials. Both tables 2.1 and 2.2 list abbreviations extensively

Рисунок 3.2. Параметризация, выраженная на пяти графиках, показывает, что в предложенной схеме инверсии использовался трехэтапный процесс оптимизации для шести параметров внутренних ограничений процесса инверсии, чтобы обеспечить оптимальное решение со среднеквадратичным коэффициентом дисперсии всего 1,62 % после тринадцати проб. В табл. 2.1 и 2.2 подробно перечислены сокращения

inaccurate-constrained inverse model for the second stage was constrained using the following parameters: (*Ze* –3536 m, *LDDbe* 2.6706 g/cc, ρ*se* 2.21 g/cc, Δρ(*LDDb*–ρ*s*)*e* 0.4606 g/cc, Δ*de* 0.0094 mGal, *DC* shift 42.661 mGal, filter LHC limit 10000 m, filter UHC limit 9600 m, convergence limit 0.0054 mGal, and regional offset 0 mGal). The optimal inverse model for the third stage was finally estimated with 1.63% inaccuracy after recovering the following parameters: (*Ze* –3534.6 m, *LDDbe* 2.6706 g/cc, ρ*se* 2.21 g/cc, Δρ(*LDDb*–ρ*s*)*e* 0.4606 g/cc, Δ*de* 0.0045 mGal, *DC* shift 42.670 mGal, filter LHC limit 20 000 m, filter UHC limit 15000 m, convergence limit 0.0001 mGal, and regional offset 0 mGal).

Connecting the three-stage best-possible inverse parameterization estimates and their inaccuracies assessed

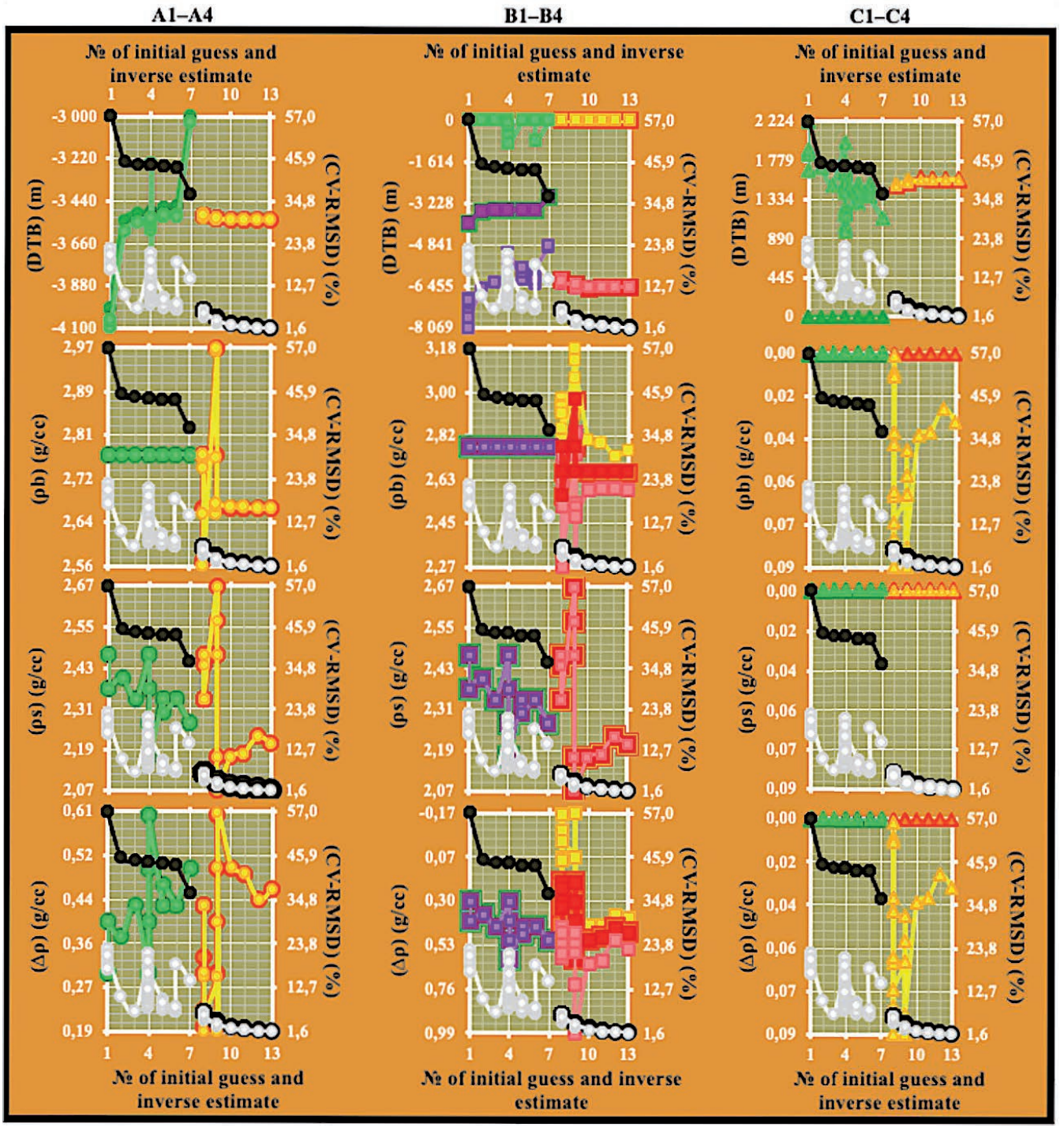


Figure 3.3. Three-stage optimization constrained by thirteen trials of decreasing root-mean-square coefficient of variance of initial guesses to recover interfaced basement-sedimentary depth-density and density contrast model solutions for mean (*A*1–*A*4), maximum (*B*1–*B*4), and standard deviation (*C*1–*C*4) parameters. Fig. 3.4 shows the legend – tables 2.1 and 2.2 list abbreviations

Рисунок 3.3. Трехэтапная оптимизация, ограниченная тринадцатью пробами уменьшения среднеквадратического коэффициента дисперсии первоначальных предположений для восстановления решений модели сопряженных глубин фундамента и осадочных пород и контраста плотности для средних (A1–A4), максимальных (B1–B4) и стандартных (C1–C4) параметров отклонения. На рис. 3.4 представлена легенда – в табл. 2.1 и 2.2 приведены сокращения

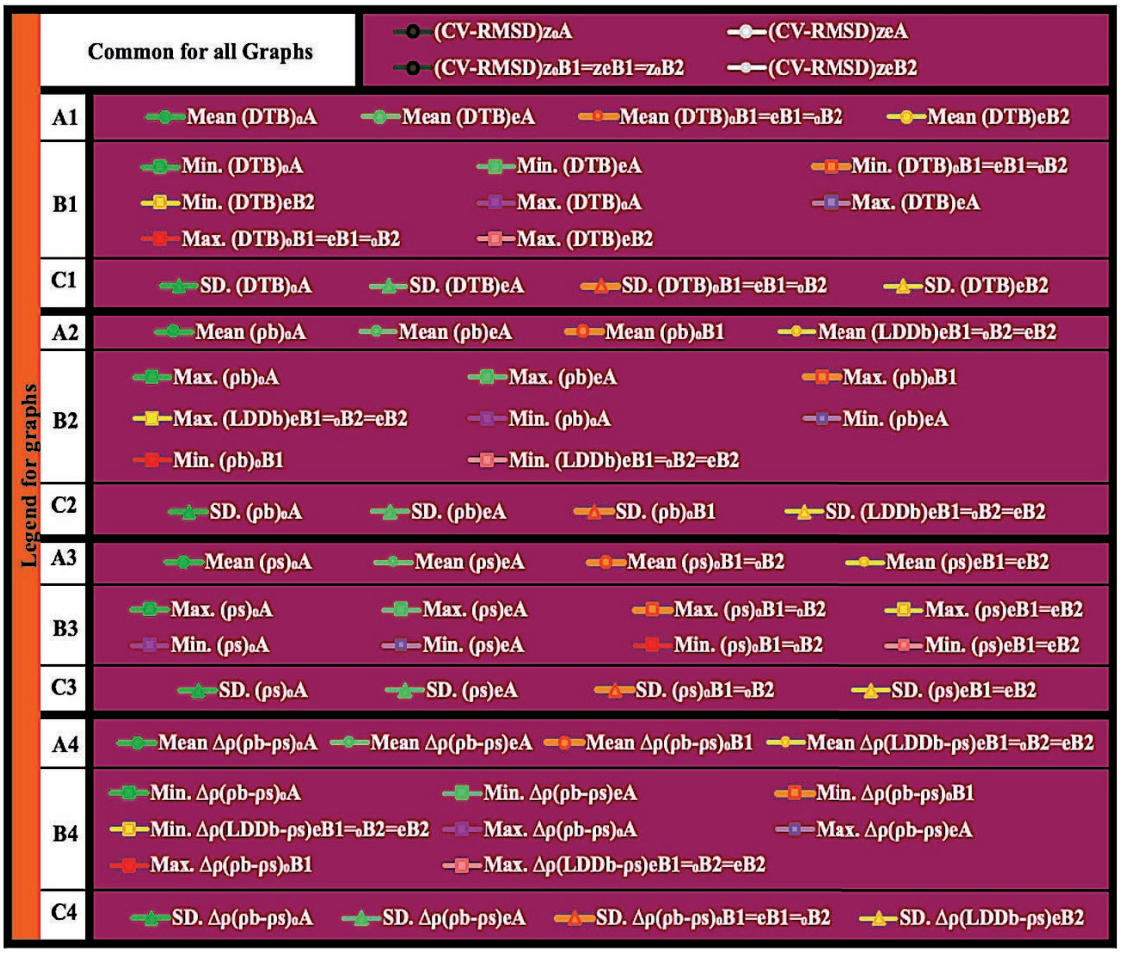


Figure 3.4. Legend of the data analysis, which is graphically represented in fig. 3.3
Рисунок 3.4. Легенда анализа данных, которая графически представлена на рис. 3.3

our scheme's optimality within this sequence: 6.4% for the first stage, 1.78% for the second, and 1.63% for the third. Iterative optimization with a zero regional offset data-misfit constraint in three stages caused this inaccuracy sequence. This optimality was obtained after these three-stage optimization sequences: mean depth (–3513, –3536, –3534.6 m), mean density contrast (0.43, 0.4606, 0.4606 g/cc), filter LHC limit (14 000, 10 000, 20 000 m), filter UHC limit (7500, 9600, 15 000 m), convergence limit (0.01, 0.0054, 0.0001 mGal), and *DC* shift (37.652, 42.661, 42.670 mGal).

The parameters estimated with 6.4 % inaccuracy recovered the optimal first-stage inverse model with these parameters: *Ze* –3513 m, ρbe 2.77 g/cc, ρ*se* 2.34 g/cc, Δρ(ρ*b*–ρ*s*)*e* 0.43 g/cc, Δ*de* 0.0506 mGal, *DC* shift 37.652 mGal, filter LHC limit 14000 m, filter UHC limit 7500 m, convergence limit 0.01 mGal, and regional offset 0 mGal. The optimal 1.78% inaccurate-constrained inverse model for the second stage was constrained using the following parameters: (*Ze* –3536 m, *LDDbe* 2.6706 g/cc, ρ*se* 2.21 g/cc, Δρ(*LDDb* – ρ*s*)*e* 0.4606 g/cc, Δde 0.0094 mGal, *DC* shift 42.661 mGal, filter LHC limit 10000 m, filter UHC limit 9600 m, convergence limit 0.0054 mGal, and regional offset 0 mGal). The optimal inverse model for the third stage was finally estimated with 1.63% inaccuracy after тrecovering the following parameters: (*Ze* –3534.6 m, *LDDbe* 2.6706 g/cc, ρse 2.21 g/cc, Δρ(*LDDb* – ρ*s*)*e* 0.4606 g/cc, Δ*de* 0.0045 mGal, *DC* shift 42.670 mGal, filter LHC limit 20 000 m, filter UHC limit 15000 m, convergence limit 0.0001 mGal, and regional offset 0 mGal).

Connecting the three-stage best-possible inverse parameterization estimates and their inaccuracies assessed our scheme's optimality within this sequence: 6.4% for the first stage, 1.78% for the second, and 1.63% for the third. Iterative optimization with a zero regional offset data-misfit constraint in three stages caused this inaccuracy sequence. This optimality was obtained after these three-stage optimization sequences: mean depth (–3513, –3536, –3534.6 m), mean density contrast (0.43, 0.4606, 0.4606 g/cc), filter LHC limit (14 000, 10 000, 20 000 m), filter UHC limit (7500, 9600, 15 000 m), convergence limit (0.01, 0.0054, 0.0001 mGal), and *DC* shift (37.652, 42.661, 42.670 mGal).

Quantitative interpretation. We evaluated with geologic correlation the key and constraint model parameters that led to the optimal thirteenth trials in the initial forward guesses and inverse estimations (Figs 4–6) of depth, density, and density contrast. These trials recover the basement complex depth-density model's whole 3D optimal image from our third-last-stage inversion scheme's best-possible parameterization sequence. The following interpretations quantitatively represent this evaluation:

The thirteenth-estimate, which represents model *B*2 in (Fig. 4), shows the third stage's optimal depth inversion procedure. The initial forward depth model has a 1.78% depth inaccuracy due to guessing parameters of Mean DTB_0 –3535.9, Max DTB_0 –6460.9,

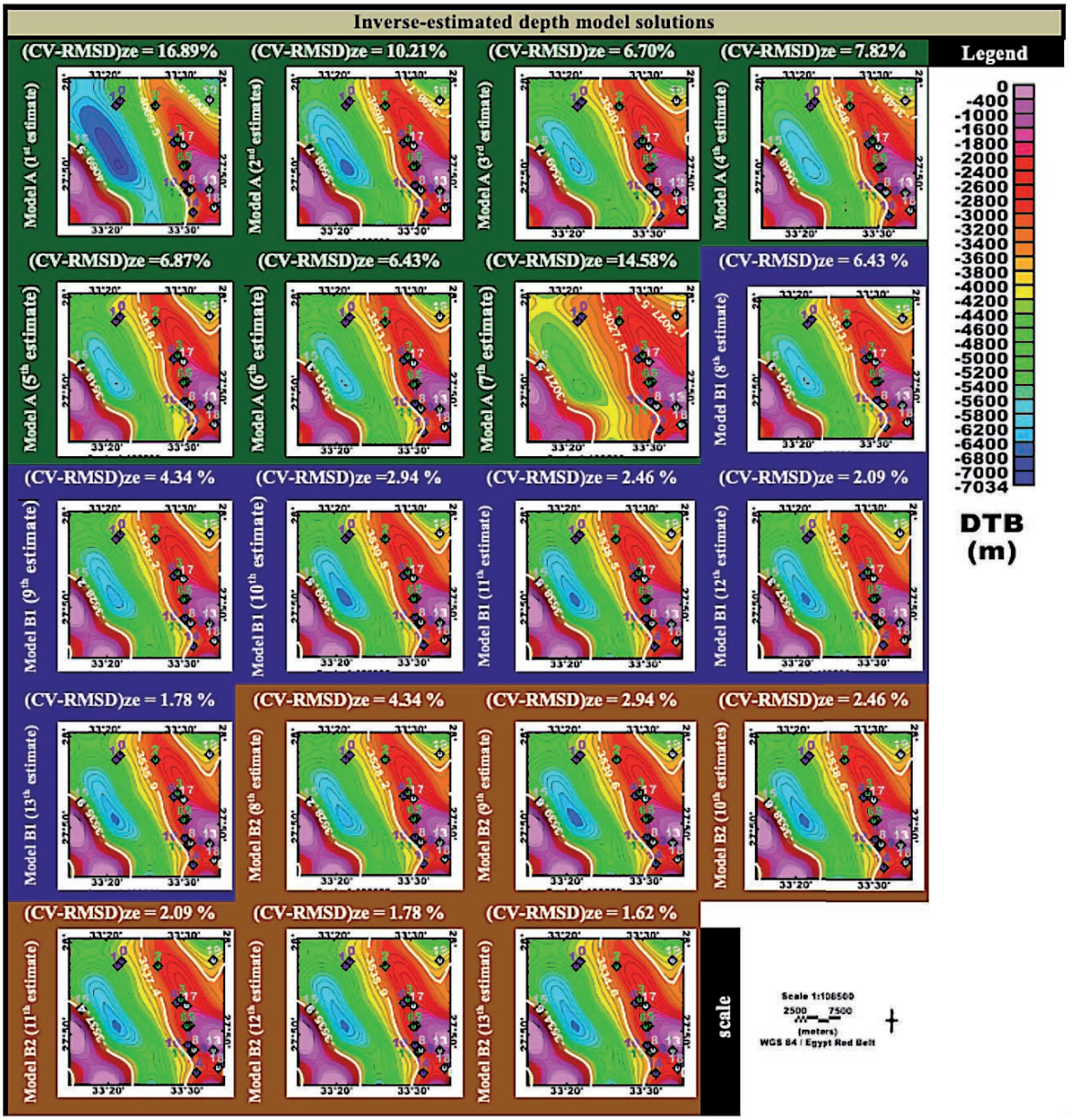


Figure 4. Three-stage depth-to-basement estimation trials are depicted by three depth models: inverse model *A* (green background, first stage), constrained model *B*1 (blue background, second stage), and inverse model *B*2 (brown background, third stage). These three-stage depth findings help to examine the optimality of three forward modeling methods with distinct scenarios

Рисунок 4. Трехэтапные испытания по оценке глубины до фундамента изображены тремя моделями глубины: обратной моделью *A* (зеленый фон, первый этап), ограниченной моделью *B*1 (синий фон, второй этап) и обратной моделью *B*2 (коричневый фон, третий этап). Эти трехэтапные измерения глубины помогают изучить оптимальность трех методов прямого моделирования с различными сценариями

Min DTB_0 0, and *SD* DTB_0 1564.8 m. Inversely estimated depth parameters (Mean *DTBe* –3534.6, Max *DTBe* –6453.2, Min *DTBe* 0, and *SD DTBe* 1567.4 m) have a 1.63% depth error. The forward beginning mean-depth parameter closely matches the optimal basement mean depth in the study area. The basement geological alteration of the thirteenth-estimate of fig. 4 suggests a Graben system underneath the research area, created by two principal normal faults running from the surface to significant depths – the geological map's basement rocks outcrop at Min *DTBe* = 0 m, the second-best fit. The third-best maximum depth parameter shows that the two principal normal faults in the center basin stretch to –6453.2 meters below sea level. Parallel to the southeast-to-northwest normal faults, secondary faults flank the central graben. Two basement complex normal faults formed the sedimentary basin between the eastern El-Zeit and western Esh El Mallaha mountain ranges. The appropriate sedimentary basin depth model can be produced by identifying the basement relief.

The third stage of the inversion scheme used optimal initial forward density guessing parameters, including Mean $LDDb_0$ 2.6706, Max $LDDb_0$ 2.7558, Min $LDDb_0$ 2.5935, and *SD* $LDDb_0$ 0.0294 g/cc, with an error constraint assumption of 1.74%. The best-constrained density parameters of Mean *LDDbe* 2.6706, Max *LDDbe* 2.7558, Min *LDDbe* 2.5935, and *SD LDDbe* 0.0294 g/cc, respectively produced a density solution with a computed depth inaccuracy of 1.63%. The mean density parameter of 2.6706 mGal in Model *B*2, represented by the thirteenth-

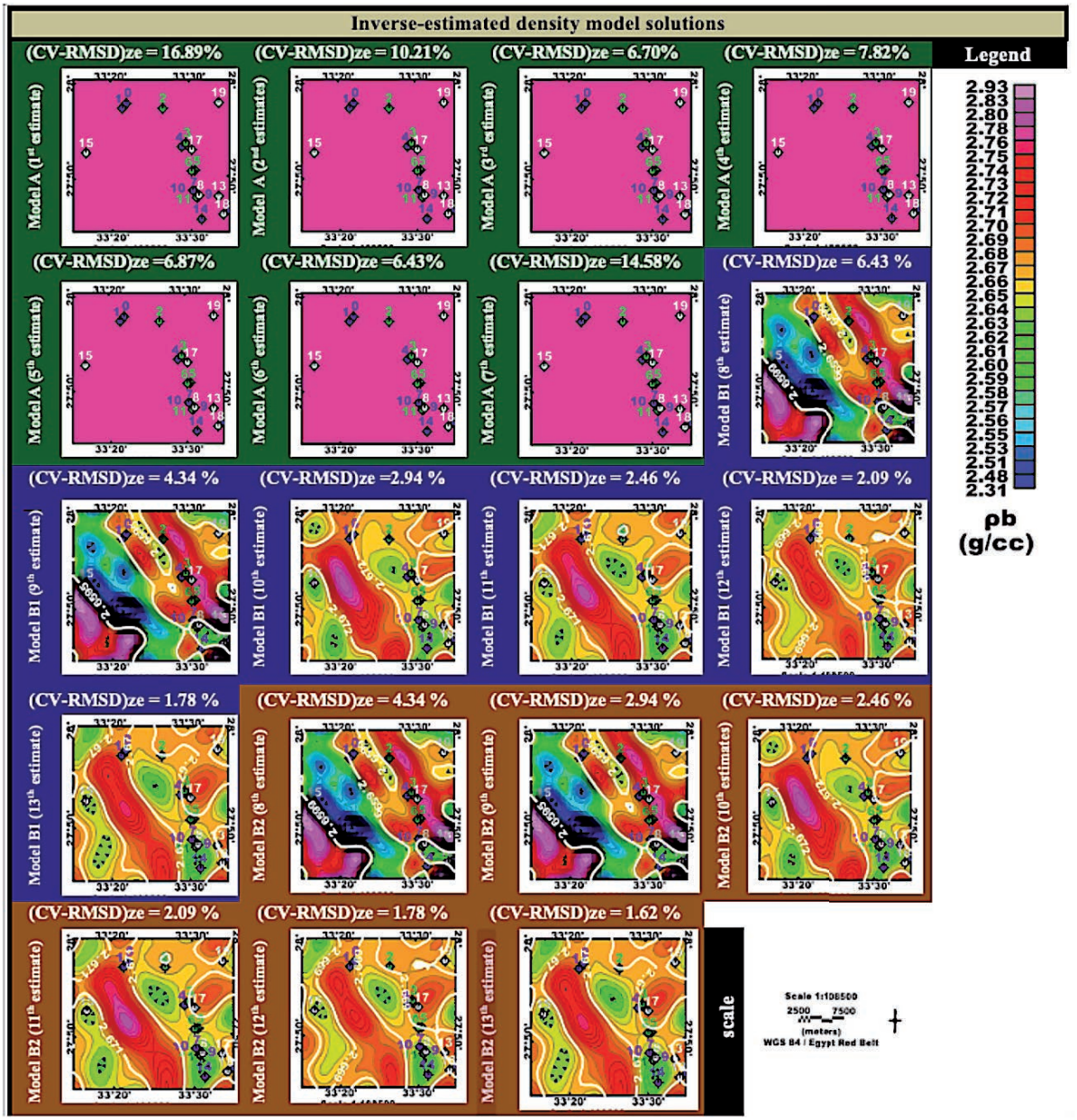


Figure 5. Three-stage basement complex lateral density estimated trials represented three models *A* (for 1st stage), *B*1 (for 2nd stage), and *B*2 (for 3rd stage). These trials reveal the constraining process used in between the second and third stages for checking the density lateral optimization procedure leading to the optimality of the basement depth with 1.62% minimal root-mean-square coefficient of variance

Рисунок 5. Трехэтапные пробы по оценке латеральной плотности комплекса фундамента представляли собой три модели *A* (для 1-го этапа), *B*1 (для 2-го этапа) и *B2* (для 3-го этапа). Эти пробы выявляют процесс ограничения, используемый между вторым и третьим этапами для проверки процедуры горизонтальной оптимизации плотности, приводящей к оптимальности глубины фундамента с минимальным среднеквадратичным коэффициентом дисперсии 1,62 %

estimate in fig. 5, suggests that granitic basement rocks dominate the basement complex's lateral mean density distribution in the research area. Acidic igneous rock densities range from 2.5935 to 2.7558 g/cc, represented by *LDDbe*'s second and third density parameters. These characteristics help determine basement depth and match pre-existing data. Inverse modeling within this density range helps recover the optimal inverse estimated depth model – the correlation between the thirteenth estimate in (Figs 4, 5) display surface basement rocks.

The optimal sixth inverse depth modeling trial's third stage used the basement-sedimentary interface as a density contrast constraint. Optimal initialized forward $\Delta\rho(LDDb - s)_0$ modeling parameters of Mean 0.4606, Max 0.5458, Min 0.3835, and *SD* 0.0294 g/cc, used to account for $\Delta\rho(LDDb - s)e$ best-possible inverse-constrained density contrast model with constrained parameters of Mean 0.4606, Max 0.5458, Min 0.3835, and SD 0.0294 g/cc. Inverse density contrast assumptions were optimized according to depth optimization. The thirteenth-estimate, which represents model *B*2 in (Fig. 6) shows the mean lateral density contrast Mean $\Delta\rho(LDDb - s)e$ 0.4606 g/cc optimally distributed on the sedimentary-basement interface in the research area. The density contrast

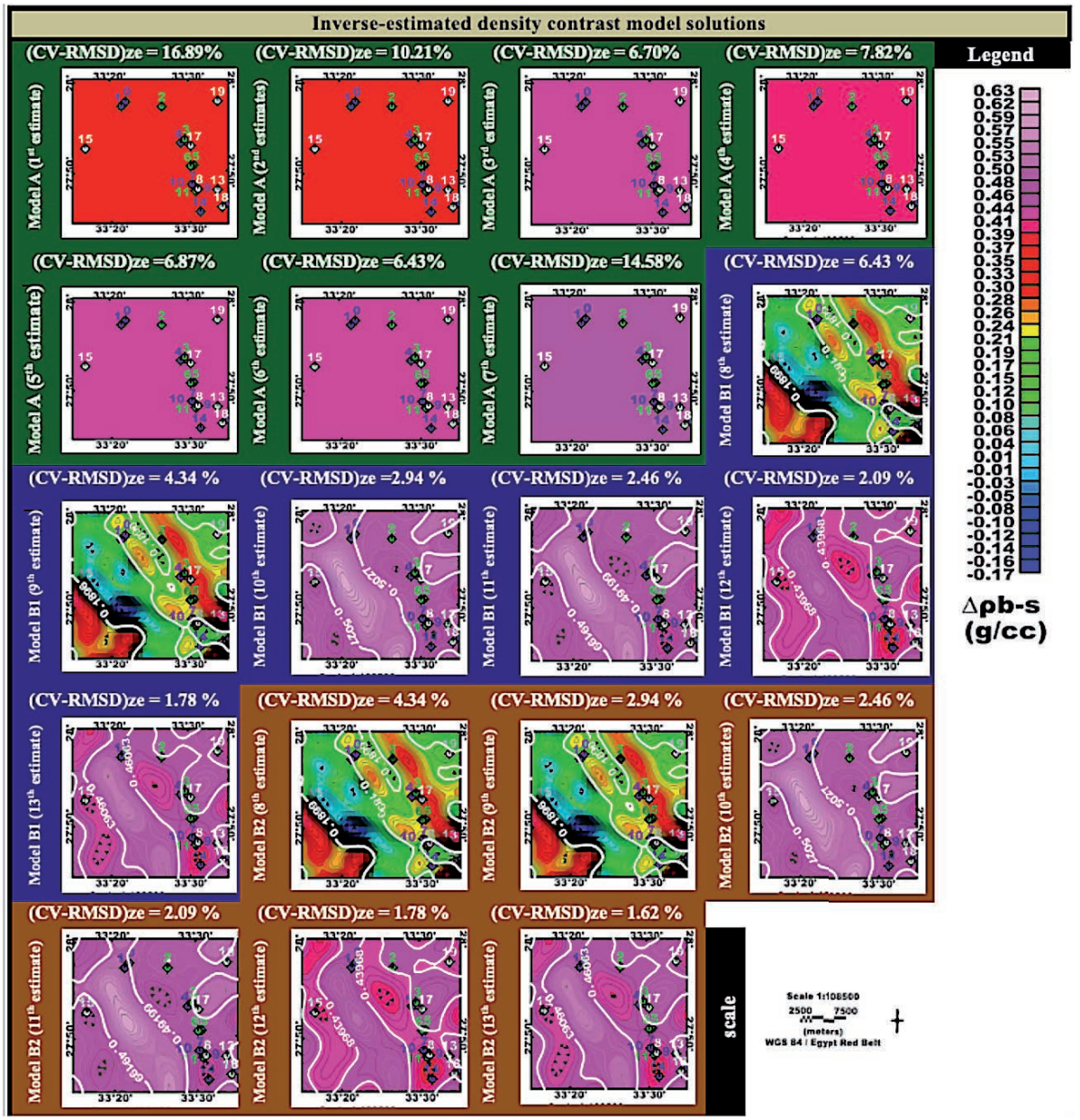


Figure 6. The three lateral density contrast stages of assumed *A* (on green), recovered *B*1 (on blue), and constrained *B*2 (on brown background) between the basement and sedimentary section. Based on basement depth root mean squares, the estimated density contrast constraining approach was utilized between stages two and three to figure out the optimal lateral density contrast between the basement and sediments, obtained at the thirteenth trial with a 1.62% coefficient of variance

Рисунок 6. Три стадии латерального контраста плотности: предполагаемый *A* (на зелёном), восстановленный *B*1 (на синем) и ограниченный *B*2 (на коричневом фоне) между фундаментом и разрезом осадочных пород. Согласно среднеквадратическим значениям глубины фундамента, подход к ограничению оценочного контраста плотности использовался между вторым и третьим этапами для определения оптимального латерального контраста плотности между фундаментом и отложениями, полученного в тринадцатой пробе с коэффициентом дисперсии 1,62 %

is laterally constrained within this range: 0.5458 – 0.3835 g/cc. An El-Zeit sedimentary-basement basinal depth model was developed using optimized density contrast parameters and their optimum constraint assumption at the interfaced surface with delineations mean error of 1.63%.

The Bouguer response of the optimal model was interpreted using the Δ*de* data-misfit parameters (Mean 0.0045, Max 14.2795, Min – 4.9724, and SD 1.3111 mGal). Thirteenth-estimate in (Figs 7, 8) show the lateral distribution of linear and normal-colored Bouguer anomalous misfits after recovering optimal inverse-estimated model solutions.

The color legend for fig. 8's thirteenth-estimate shows the minimum mean data misfit estimations of 0.0045 mGal, encompassing most of the study area between the estimated and observed Bouguer anomalies, with mean values of *de* = –24.9139 and *da* = –24.9094. The mean Bouguer anomaly misfit falls between –4.9724 and 14.2795 mGal.

Thirteenth-estimate in fig. 7 shows how two substantial normal faults and elongated basins in the sedimentary layer above the basement complex allowed oil to migrate from the El-Zeit central basin at high pressure and accumulate where these elongated basins are at low pressure. These Extended

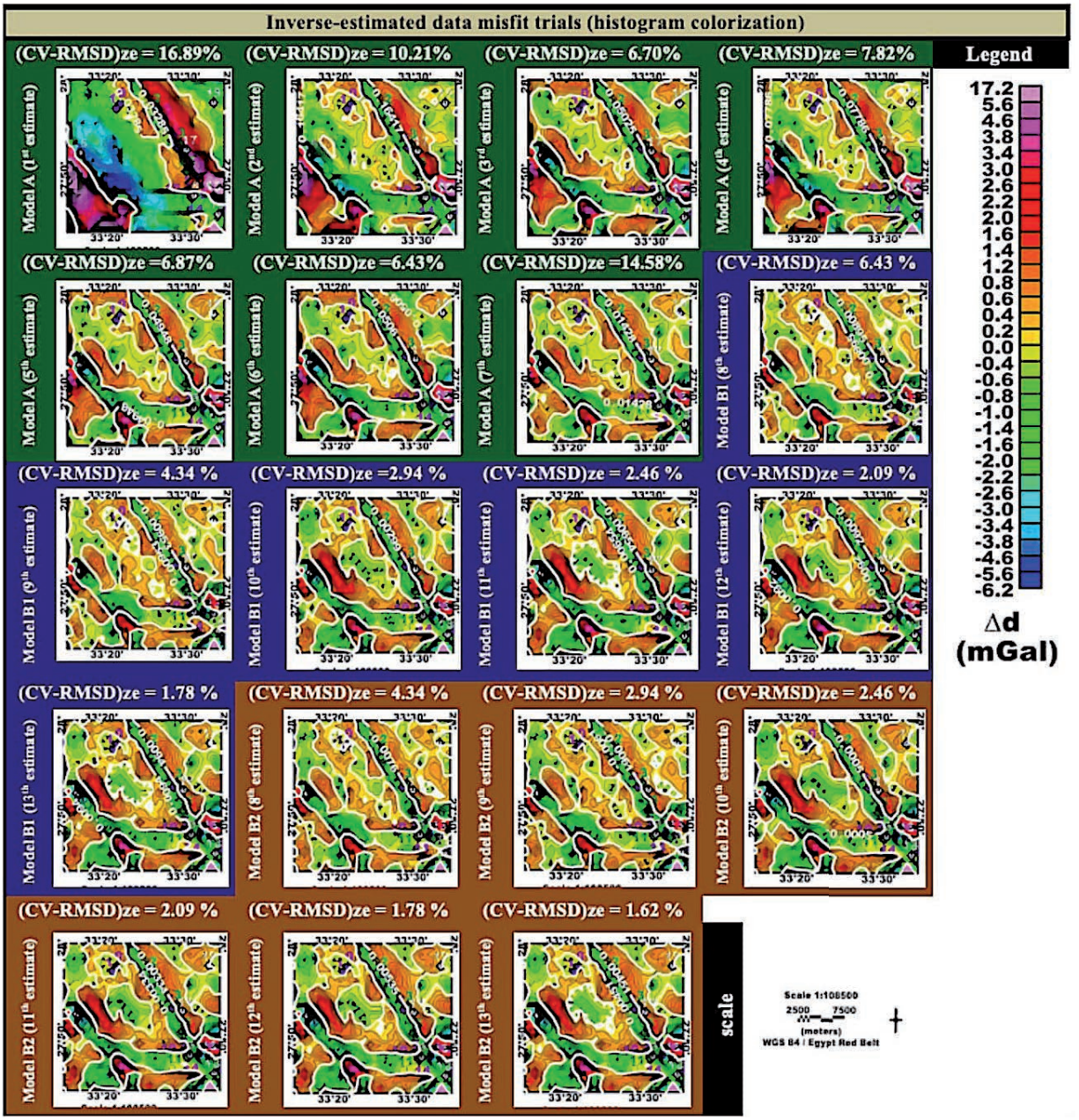


Figure 7. The three-stage optimization process of normally colored-estimated residual Bouguer anomaly gravity data produced an image limited by a 1.62% error in the depth of the sedimentary basinal structure above the basement complex, which formed the deep basin pattern in the study area of the Gebel El-Zeit area. Models *A*, *B*1, and *B*2 plot trials on green, blue, and brown backgrounds, respectively

Рисунок 7. Трехэтапный процесс оптимизации нормальных оцененных цветных остаточных гравитационных данных аномалии Буге позволил получить изображение, ограниченное ошибкой 1,62 % в глубине осадочной структуры бассейна над комплексом фундамента, что сформировало структуру глубокого бассейна в районе исследования Гебель-эль-Зейт. Модели *A*, *B*1 и *B*2 отображают пробы на зеленом, синем и коричневом фоне соответственно

basins cause low Bouguer anomalies, as revealed on the map of this thirteenth-estimate. The two principal normal faults of the Graben system compressed sedimentary strata over a basement complex to generate these basins. Middle El-Zeit fault compression creates subsidiary sedimentary basins.

The optimal model's minimal error solutions were achieved by imposing the following constraints on the third-last stage's inverse-estimated parameterization sequence: *DC* shift of 42.6709 mGal, filter LHC limit of 20 000 m, filter UHC limit of 15 000 m, convergence limit of 0.0001 mGal, and regional offset of 0 mGal. The first constraint parameter (*DC* shift = 42.6709 mGal) predicted the initial mean depth parameter (Mean DTB_0 = –3536 m) and the inverse mean depth (Mean *DTBe* = –3534.6 m). The second constraint parameter, which bounds the filter LHC to 20 000 m, smoothed the optimal inverse-estimated mean density-depth model and mean-Bouguer-anomaly response. The third constraint, which bounds filter UHC to 15 000 m, optimizes the second constraint. The second and third parameters determine model solution and data calculation detailedness and smoothness. The research area's optimal inverse model solutions fit estimated and observed Bouguer

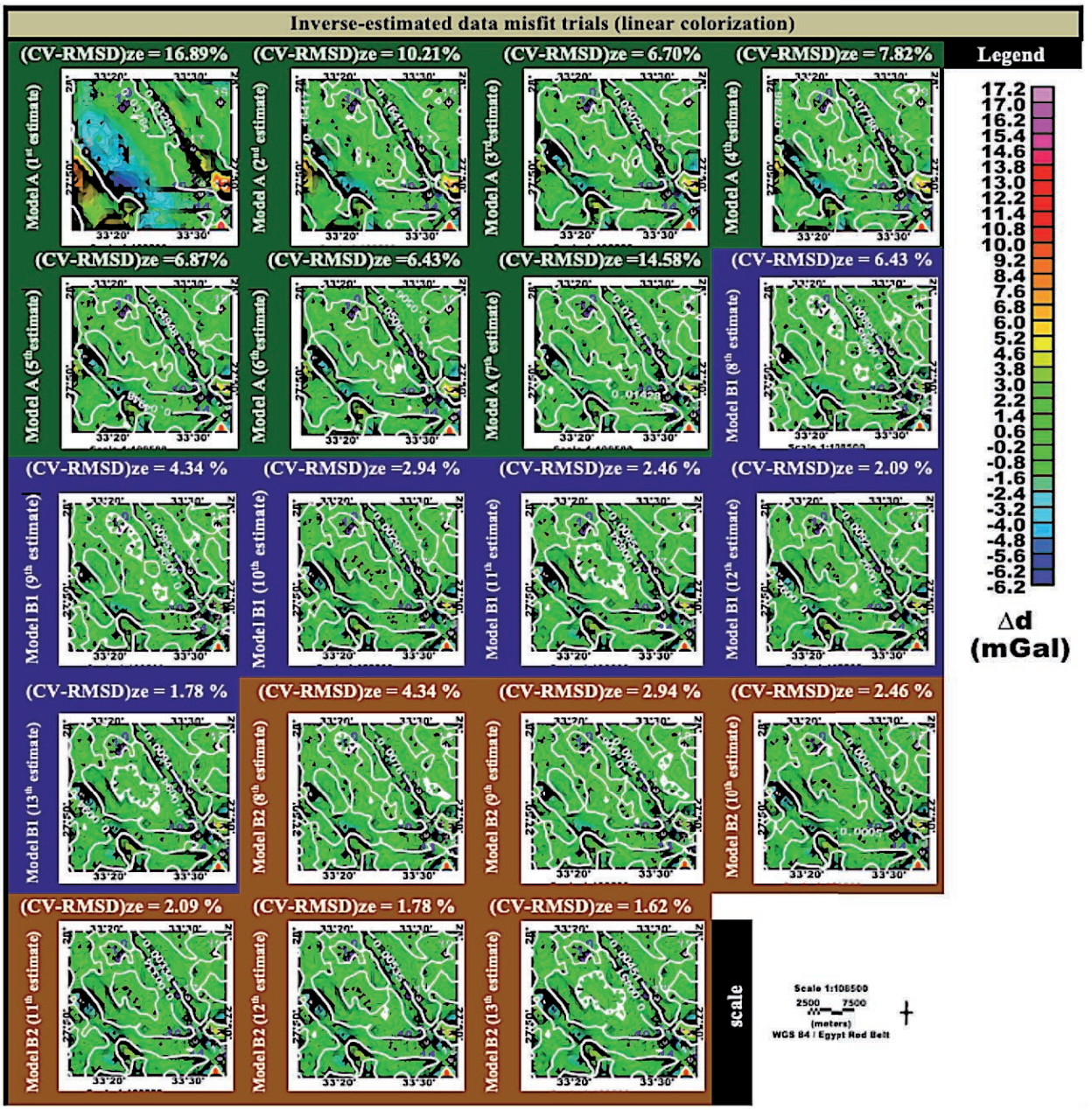


Figure 8. Linearly colored maps of residual Bouguer anomaly gravity data match the normal colorized-estimated maps, shown in fig. 5. These maps reflect the optimization with the constraining procedure of the three-stage inversion scheme's mean data misfit, yielding an optimal solution with a low root-mean-square coefficient of variance of 1.62%. Model *A* shows first-stage estimations on green, Model *B*1 on blue, and Model *B*2 on brown

Рисунок 8. Линейно раскрашенные карты остаточных гравитационных данных аномалии Буге соответствуют нормальным цветным оценочным картам, показанным на рис. 5. Эти карты отражают оптимизацию с помощью процедуры ограничения несоответствия средних данных трехэтапной схемы инверсии, что дает оптимальное решение с низким среднеквадратичным коэффициентом дисперсии 1,62 %. Модель *A* показывает оценки первого этапа зеленым цветом, модель *B*1 — синим, а модель *B*2 — коричневым

anomalies with a mean misfit of 0.0045 mGal. Zeroing the fourth regional offset constraint parameter accomplishes this. The inversion run ends when the fifth convergence limit parameter, 0.0001 mGal, reduces the standard deviation difference between the data misfit of the last two iterations. The fourth and fifth constraint parameters help compute the optimal inverse model solution with minimal computational errors.

Evaluation of the inversion stages

Quality control and indirect constraint at drilled wells` locations. Figs 9.1; 9.2 show the constraint wells utilized for quality control and testing the optimality of inversion solutions. Gravity inversion was used to determine the 3D basement depth using 19 wells in the research region. To reconcile calculated data and model solutions with observed values, the *DC* shift, convergence limit, regional offset, and filter's lower-upper high cut limits were adjusted. As the first quality control, six Basement constraint wells were used after inversion to check if the inverse depth values were within the analytical depth range. As a secondary quality control test, we checked if the optimal inverted basement

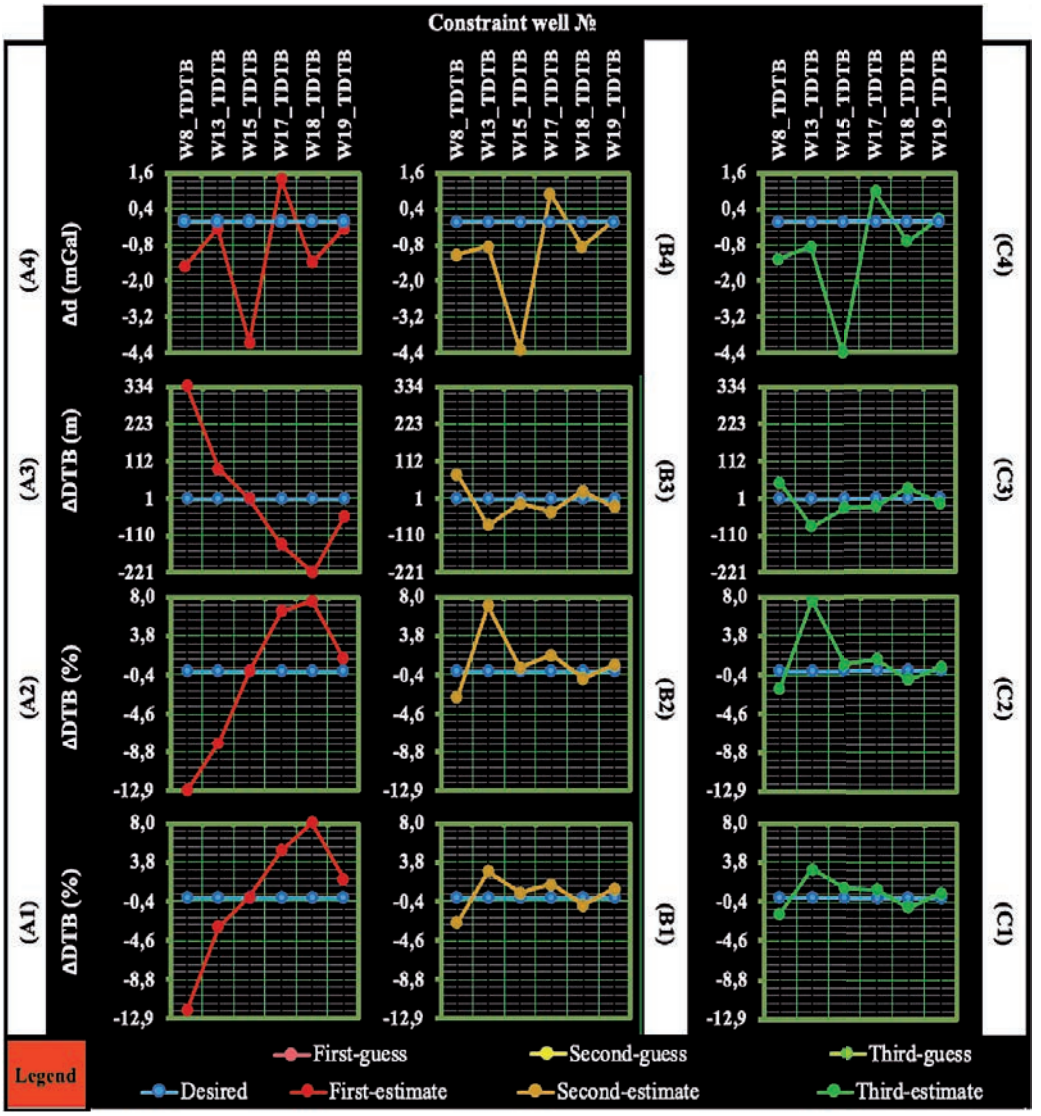


Figure 9.1. The optimality of a three-stage best-possible forward-guesses and inverse-estimates depth-density model solution analyzed for wells with a reachable total basement depth constraint, revealing the best indirect quality control test executed within the proposed inversion scheme

Рисунок 9.1. Оптимальность трехэтапного решения модели глубины–плотности с наилучшими возможными предположениями и обратными оценками, рассчитанными на скважины с достижимым ограничением общей глубины фундамента, выявила лучший тест косвенного контроля качества, выполненный в рамках предложенной схемы инверсии

depth surpassed the depth of the thirteen inaccessible basement constraint wells.

The first and second controls imply a forward-starting model with weak depth limitations and then invert the optimum 3D lateral depth solution with little error. This strategy works better with minimal prior knowledge and uses the recommended inversion method in a unique field that requires more data for reasonable projections.

Regarding the third quality control, this study compared computed and actual Bouguer anomalies at nineteen accessible control wells. A tertiary control test can obtain a mean data misfit near zero by halting inversion at regional null offsets. The depth-density model's optimal solution matches the scenario's minimal data misfit (Fig. 9.1, Graphs *A*4–*C*4, and fig. 9.2, Graphs *B* and *C*) support this claim.

In the fourth control test, we examined lateral basement density and the disparity between the basement and sedimentary densities to test our inversion scheme's density estimations. This work tested a lateral density model to optimize the density contrast between the basement and sedimentary layers and reduce basement depth estimation inaccuracy.

The graphs *A*3–*C*3 (Fig. 9.1) show that the sixth optimal inverse trial of the mean basement depth model had the lowest calculation error for the first stage of the proposed inversion scheme. The six constraint wells' actual and estimated depths related by first-stage optimality revealed this sequence of estimated depths of *W*8 – 2910.6, *W*13 – 1216.68, *W*15 – 3767, *W*17 – 2023.1, *W*18 – 2686.7, and *W*19 – 3995.3 m, misfitting with the actual depths by this misfit sequence of *W*8 – 333.6, *W*13 – 87.8, *W* – 15 2.0, *W*17 138.8, *W*18 221.2, and *W*19 55.7 m. Our third stage updated the basement depth model as follows: *W*8 – 2624, *W*13 – 1044.2, *W*15 – 3738.7, *W*17 – 2135.4, *W*18 – 2938.3, and *W*19 – 4035.5 m, resulting in the best correlation to the actual depths. Hence, the depth misfit sequence decreased considerably to be (*W*8 – 46.9, *W*13 84.7, *W*15 30.2, *W*17 26.5, *W*18 – 30.2, *W*19 15.4 m). The depth

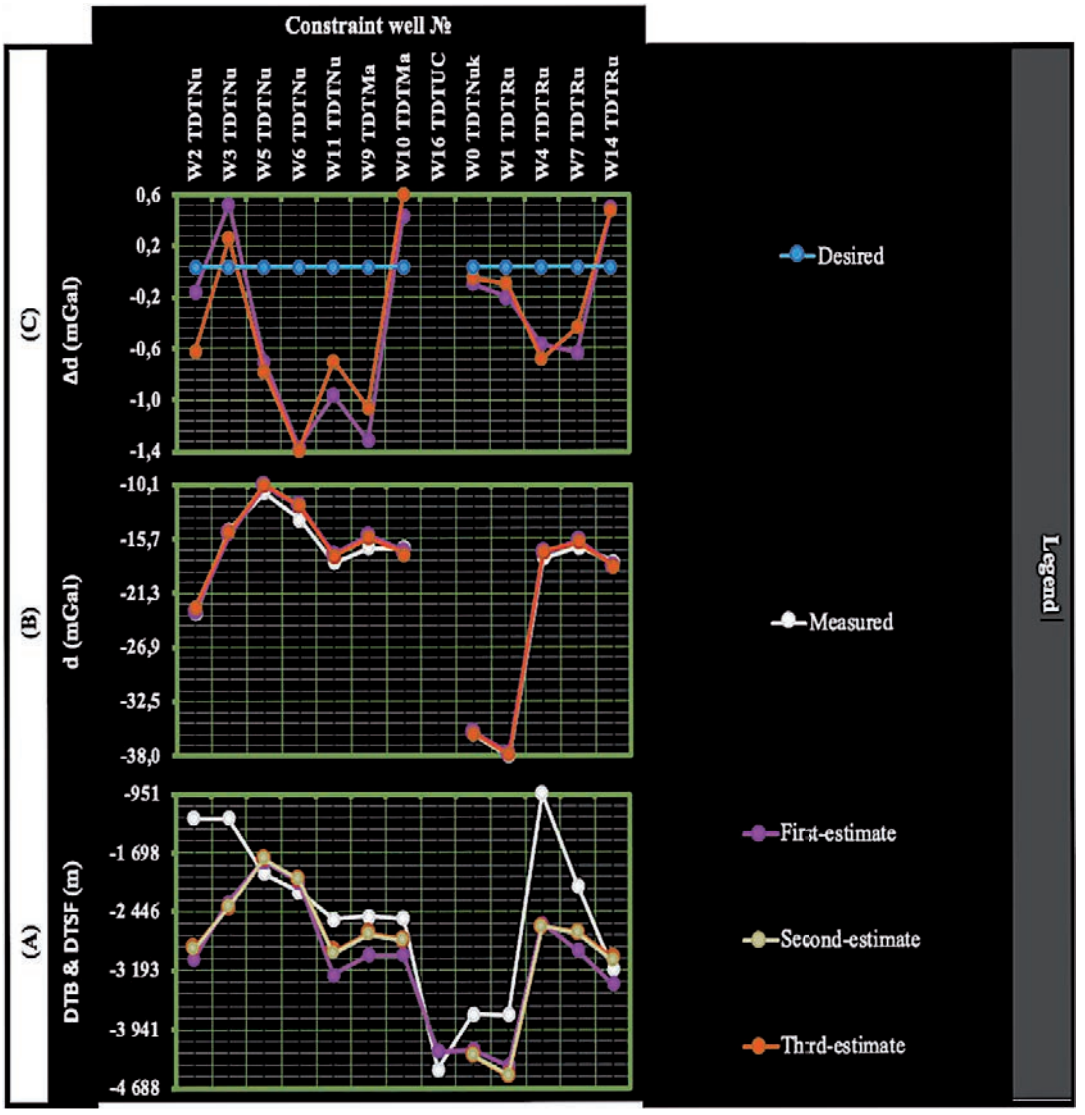


Figure 9.2. The indirect best quality control carried out on the inverse results of the proposed inversion scheme constrained by the minimal estimated data misfit (Graphs *A* and *B*) revealed by the inverse analysis of the three-stage best-possible basement depth model estimates for thirteen unreachable total depth basement constraint wells (graph *C*). A comprehensive list of abbreviations is provided in table 2

Рисунок 9.2. Косвенный контроль наилучшего качества осуществляется на основе обратных результатов предложенной схемы инверсии, ограниченной минимальным несоответствием расчетных данных (графики *А* и *Б*), выявленным в результате обратного анализа трехэтапных оценок модели наилучшей глубины фундамента для тринадцати недостижимых скважин с ограничением фундамента общей глубины (график *С*). Полный список сокращений представлен в табл. 2

misfit sequence shows that our third stage produces a more accurate optimal depth model.

Graphs *A*2–*C*2 in fig. 9.1 explains the sequencing-reestimated depth misfit percentages. The first stage's sixth optimal depth misfit trial resulted in a percentage inaccuracy sequence of *W*8 12.9, *W*13 7.7, *W*15 –0.05, *W*17 –6.4, *W*18 – 7.60, and *W*19 – 1.37 %, while the third stage had a percentage inaccuracy sequence of *W*8 1.8, *W*13 7.5, *W*15 0.8, *W*17 1.2, *W*18 1.0, and *W*19 – 0.4%.

Graphs *A*1–*C*1 in (Fig. 9.1) compares the re-estimated optimal depth misfit sequences to the mean basement depth of the six constraint wells. The graph shows well-specific percentage coefficients of variation. The first stage re-estimates the sixth optimal depth misfit sequence with estimates *W*8 12.0, *W*13 13.2, *W*15 – 0.07, *W*17 – 5.0, *W*18 – 7.9, and *W*19 – 2.0%, while the third stage re-estimates the sequence with estimates *W*8 1.7, *W*13 -3.0, *W*15 – 1.1, *W*17 – 0.9, *W*18 1.1, and *W*19 – 0.5%.

As shown in fig. 9.1, graph *C*2, the confined mean density trial was allocated among six controlled wells based on lateral density sequence with best-possible constrained densities of 2.617, 2.668, 2.634, 2.689, 2.665, and 2.661 g/cc at the constraint wells *W*8, *W*13, *W*15, *W*17, *W*18, and *W*19, respectively.

Fig. 9.2, graph *C*4 shows the six wells' data-misfit sequence between estimated and observed data (*W*8 –1.254, *W*13 – 0.856, *W*15 – 4.414, *W*17 1.000, *W*18 – 0.704, and *W*19 0.088 mGal), which reflects the optimality of the basement depth-density solution. Fig. 9.2, graph *C* shows that the data-misfit sequence (*W*2 – 0.6515, *W*3 0.2162, *W*5 – 0.8159, *W*6 – 1.4316, *W*11 – 0.7332, *W*9 – 1.0979, *W*10 0.5582, *W*0 – 0.0871, *W*1 – 0.1342, *W*4 – 0.7195, *W*7 – 0.4348 mGal) resulted in the basement optimal estimated depths being more profound than the actual depths of various sedimentary formations in the sedimentary section for the thirteen wells.

Fig. 10.1, Map *B* shows lines *A*-*A*', *B*-*B*', *C*-*C*', and *D*-*D*', indicating the asymmetrical basin's breadth along the

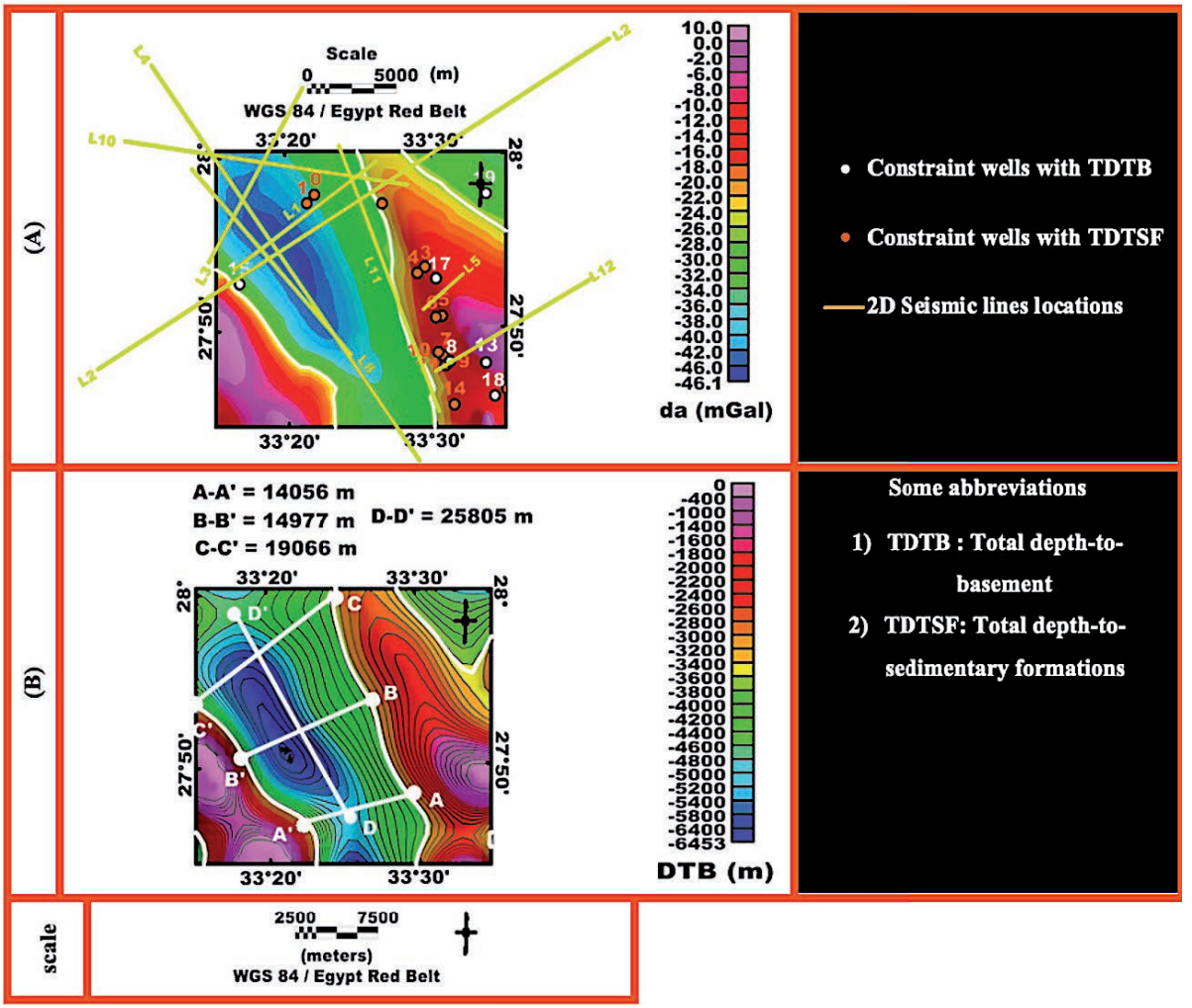


Figure 10.1. The study area's accessible seismic line sites, as shown on a map of Bouguer gravity data (*A*) and measurements of the El-Zeit basin's 1.62% roughly dimensions using mean depth white contour line as an indicator in the proposed inversion scheme's third-final stage optimal-inverse basement depth map (*B*)

Рисунок 10.1. Доступные участки сейсмических линий на территории исследования, как показано на карте гравитационных данных Буге (*A*) и измерений 1,62 % приблизительных размеров бассейна Эль-Зейт с использованием белой контурной линии средней глубины в качестве индикатора на третьем заключительном этапе предлагаемой схемы инверсии оптимально-обратной карты глубины фундамента (*B*)

northwest-southeast axis. These lines are 25805 m long and 14 056, 14 977, and 19 066 m wide. The southern, middle, and northern basin widths are estimated. The appropriate sedimentary basin depth model can be produced by identifying the basement relief.

Quality control thru extraction of 2D gravity models at seismic lines' locations. Our fifth quality control test used a 3D gravity inverse optimal depth-density model solution to create 2D gravity model cross sections at 2D seismic line sites (Fig. 10.2) to show the basement relief of the El Zeit basin. (Fig. 10.3) show minimal Bouguer misfits resulting from the 2D optimal solutions of the density contrast interface between the basement and sedimentary layers (Figs 10.4) and the basement depth and basement complex's lateral density distribution (Fig. 10.5).

Figs 10.2–10.6 show 2D gravity inversion results for 13 seismic lines. The sixth trial in the inverse parameterization sequence of the inversion scheme's third-final stage yielded the optimal three-dimensional depth-density-gravity model for the study area. Inverse modeling yielded the best extracted two-dimensional gravity models from this model with minimal calculated inverse data misfit error, validating the optimal key parameter values of the 2D extracted model.

Conclusions

This study presents a multi-dimensional three-stage gravity inversion scheme for the southwestern part of the Gulf of Suez at the Gebel Zeit study area. The scheme incorporates three techniques involving different forward and inverse modeling scenarios. The optimization procedure focuses on parameterizing the forward modeling constrained by gradual decreased mean depth error initial guesses and optimizing inverse modeling estimates through multiple trials. The main objective is to obtain optimal solutions for the three-dimensional depth-density model, specifically the depth-to-basement, lateral density distribution of the basement complex, and lateral density contrast at the basement-sedimentary interface.

The starting three-dimensional forward depth-density models were initially built up with different guesses of

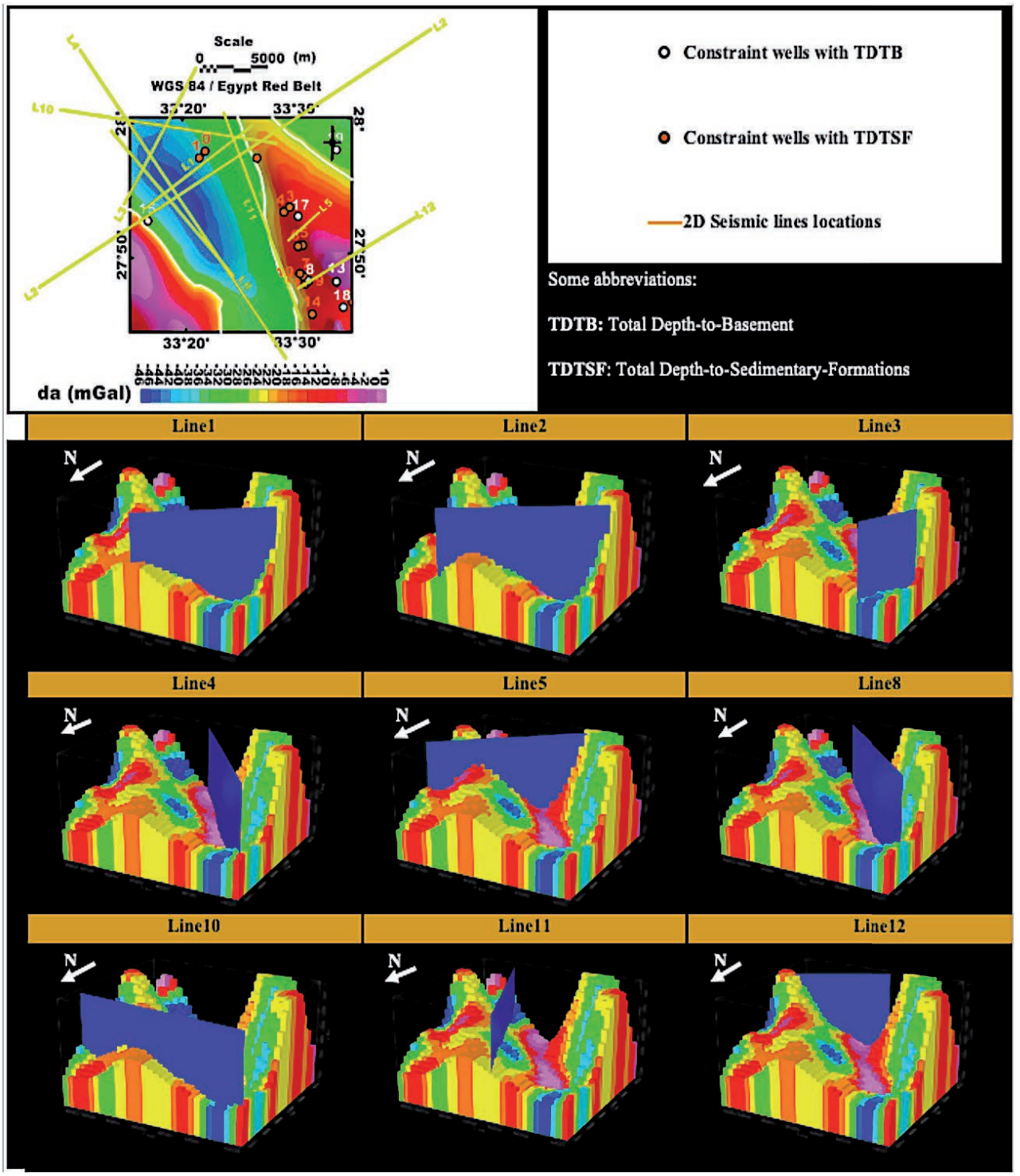


Figure 10.2 (continued in fig. 10.3)
Рисунок 10.2 (продолжение на рис. 10.3)

assumptions of using unconstrained even depth surfaces and constrained homogenous two-layered density trials, then using constrained uneven depth surfaces and unconstrained homogenous two-layered density trials, and finally using unconstrained uneven depth surfaces and constrained heterogenous two-layered density trials. The root-mean-square depth error coefficient of variance was initially guessed according to prior information about the actual basement mean depth gained from six reachable basement constraint wells accessible in the study area and constrained to be gradually decreasing through the three-stage forward modeling's creation sequence in the scheme. The forward and inverse parameterization sequences of the three techniques used were correlated within data analysis, reflecting the overall optimality of the scheme in decreasing the first-stage 56.9% starting error in forward modeling's initiation process to the third-stage 1.63% minimal estimated error in inverse modeling's recovery process.

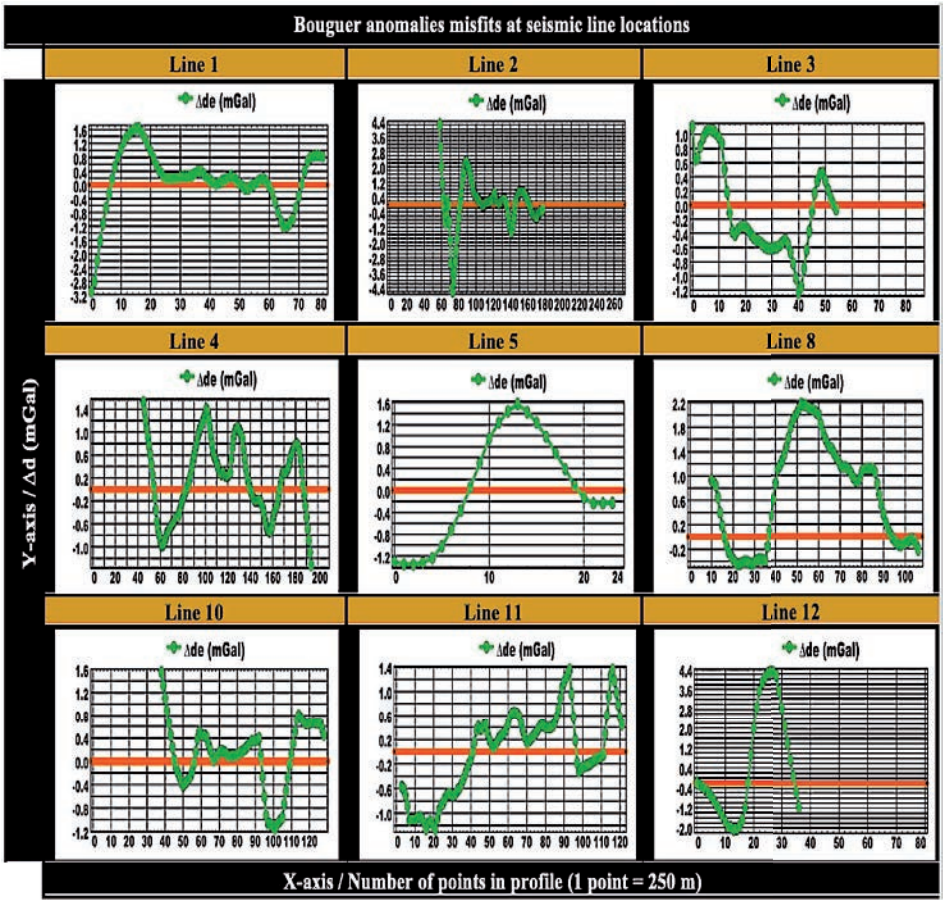


Figure 10.3 (continuation of fig. 10.2, continued in fig. 10.4)
Рисунок 10.3 (продолжение рис. 10.2, продолжение на рис. 10.4)

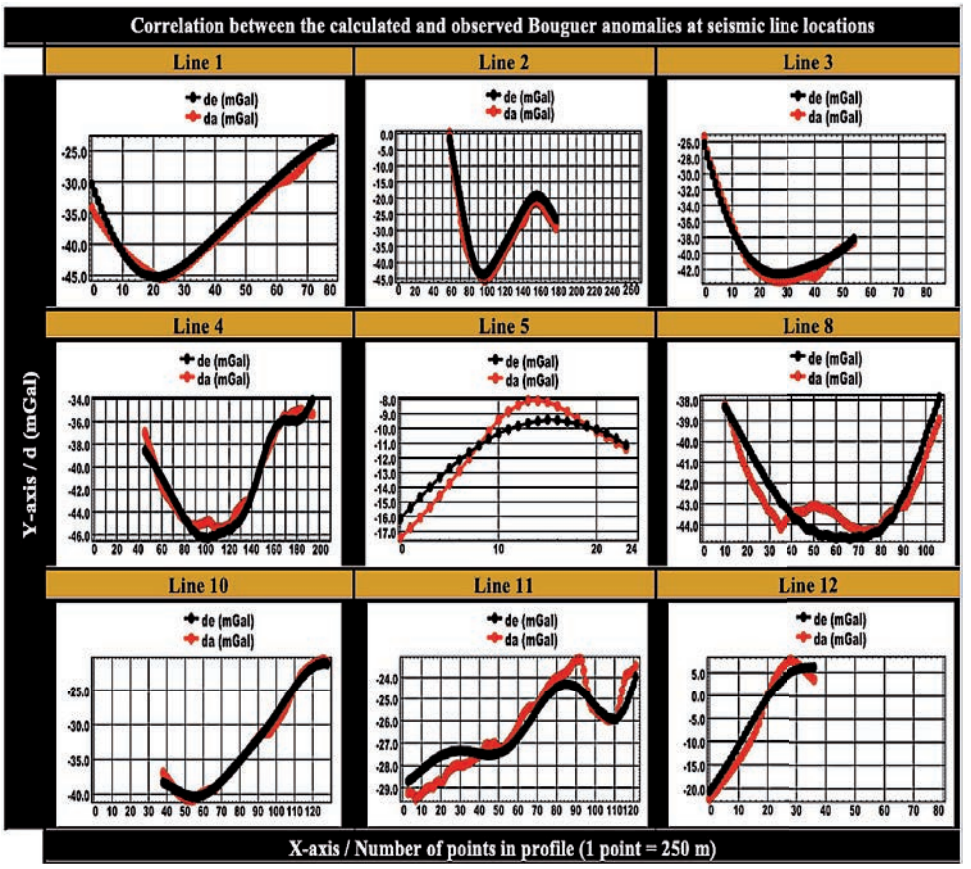


Figure 10.4 (continuation of fig. 10.3, continued in fig. 10.5)
Рисунок 10.4 (продолжение рис. 10.3, продолжение на рис. 10.5)

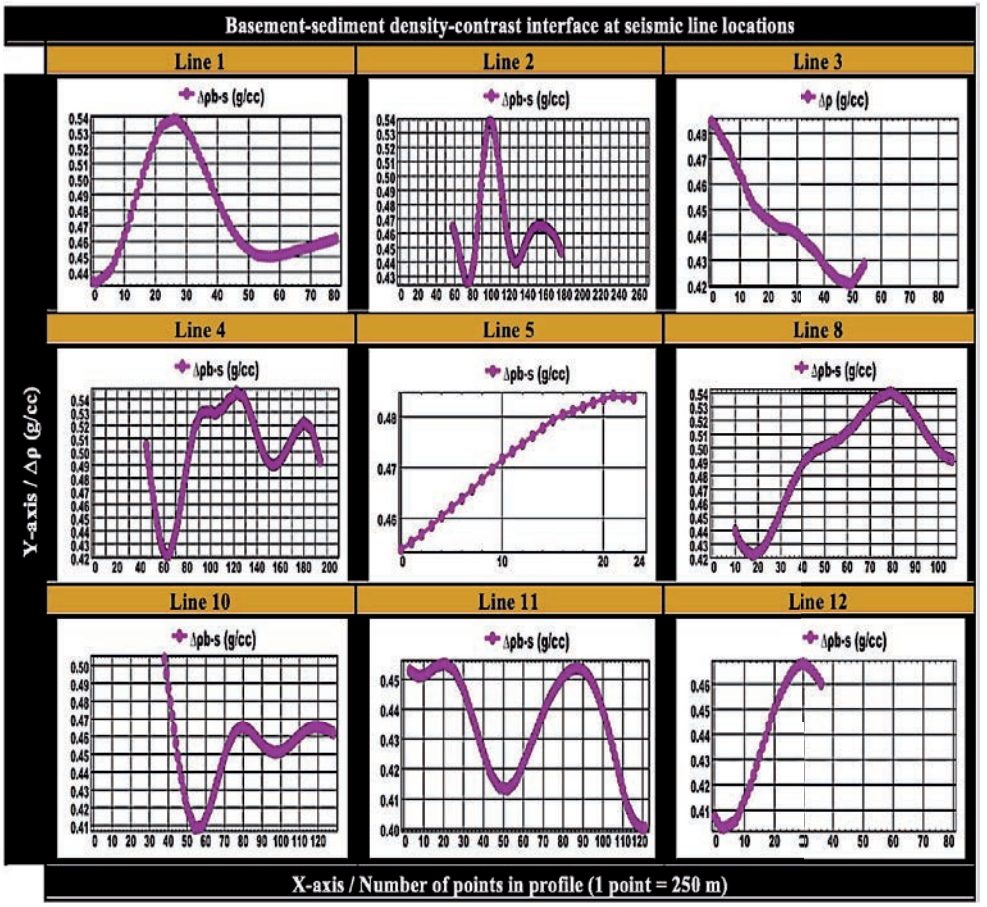


Figure 10.5 (continuation of fig. 10.4, continued in fig. 10.6)
Рисунок 10.5 (продолжение рис. 10.4, продолжение на рис. 10.6)

The study aimed to improve the scheme's credibility for future recommendations in new places with inadequate data and prior information. Refining the scheme yielded optimized depth-density model solutions that correlated best with geological data and minimized error estimates. The study employed a scheme parameterization strategy that followed the inversion process constraint of *DC* shift instead of the direct constraint of the accessible wells, balancing initial guesses with inverse estimates. The zero-regional offset requirement minimized residual estimated Bouguer gravity data misfit and aids inverse model recovery.

After conducting a depth inversion procedure using three forwardly modeled scenarios and a density inversion procedure using additional three forwardly modeled scenarios, the optimal basement depth in the area ranged between 0 and 6500 m from sea level. The predicted basement relief in the research region was depicted with a basinal structure in the central area and a basement complex lateral density model was recovered with densities ranging from 2.6706 to 2.7558 g/cc with a mean of 2.6706 g/cc for a 3534 m mean basement depth recovered with error of 1.63%.

The study assessed the effectiveness of recovering the 3D depth-density model at nine seismic lines, helping to identify the basement relief in the region, which is obscured in 2D seismic interpretation due to salt diapers. The fully recovered optimal three-dimensional image of the deep sedimentary structure above the basement relief in the research area provided valuable geological insights.

Acknowledgments

The researcher Ahmed G. M. Hassan, appreciates the financial support given to him by the Arabic Republic of Egypt, represented in the central department of Missions under the Cultural Affairs and Missions Sector at the Ministry of Higher Education of Egypt, covering his living expenses along with his study in Saint Petersburg State University in Russia. Also, he appreciates the chance given to him by the Russian Federation side, represented by the Russian Ministry of higher education, to be enrolled in a Ph.D. Program by a scholarship without payment of the education fees.

Authorship contributions

Ahmed G. M. Hassan: Conceptualization, methodology, software, formal analysis, validation, resources, writing – original draft preparation. Karam S. I. Farag: formal analysis, writing – review and editing, visualization. ALaa A. F. Aref: supervision. Alexey L. Piskarev: supervision. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

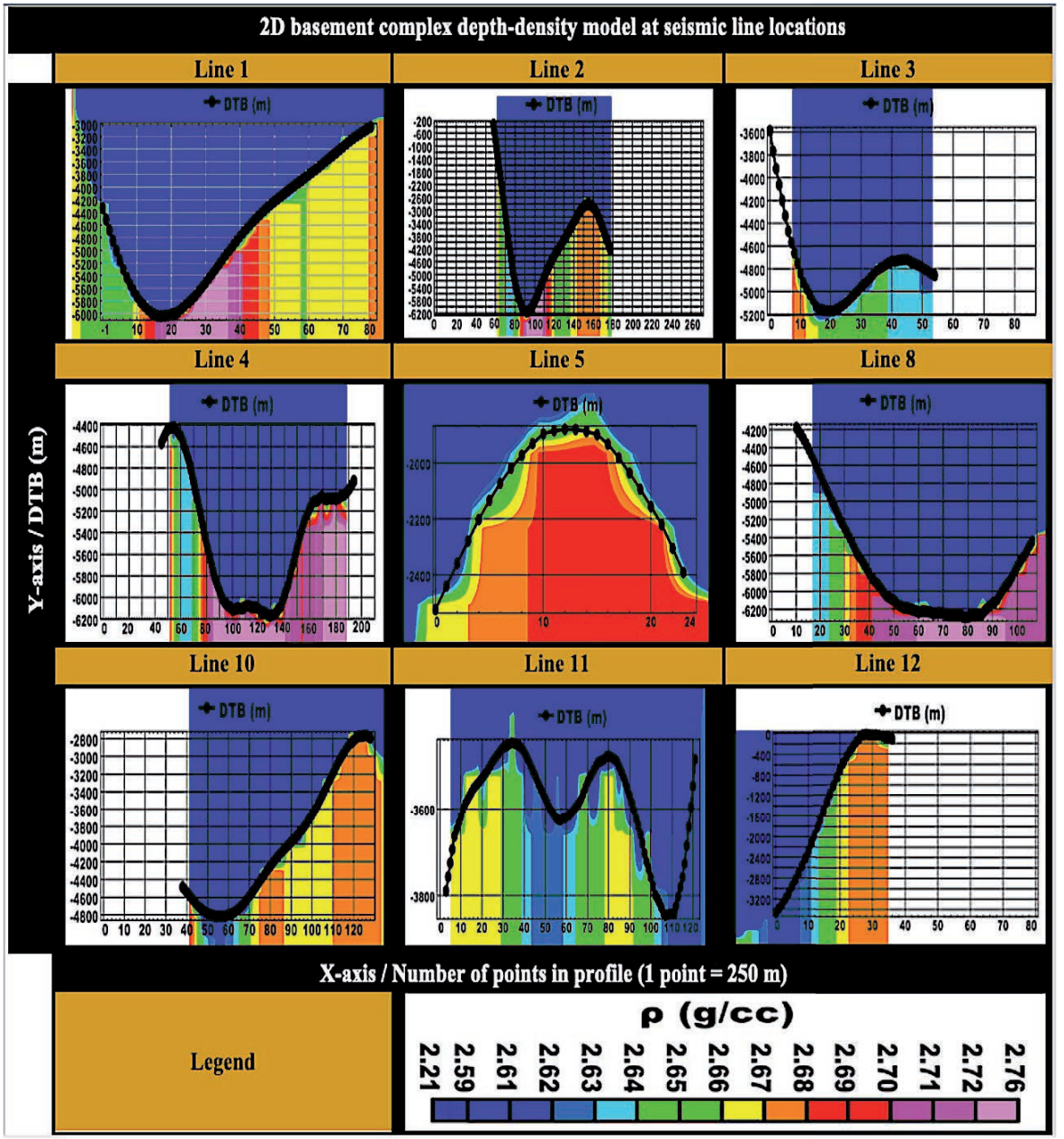


Figure 10.6. The continuation of figs 10.1, 10.2, 10.3, and 10.4, which together display the third-final stage optimality of the proposed inversion scheme in demonstrating the best quality control in extracting 2D basement depth-density model solutions from 3D inverted basement complex gravity model solutions with minimal Bouguer gravity data misfit at nine seismic lines

Рисунок 10.6. Продолжение рис. 10.1, 10.2, 10.3 и 10.4, которые вместе демонстрируют оптимальность третьего заключительного этапа предлагаемой схемы инверсии при демонстрации наилучшего контроля качества при извлечении решений 2D-модели глубины и плотности фундамента из 3D-решений инвертированной сложной гравитационной модели фундамента с минимальным несоответствием данных гравитации Буге на девяти сейсмических профилях

Disclosure of Funding Sources

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

Declaration of Competing Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

REFERENCES

1. Jessell M. et al. 2014, Next Generation Three-Dimensional Geologic Modeling and Inversion. Building Exploration Capability for the 21st Century. Karen D. Kelley, Howard C. Golden (eds). Littleton, Colorado, USA: Society of Economic Geologists, Inc., ch. 13, pp. 261–272. https://doi.org/10.5382/SP.18.13

2. Fan D., Li S., Li X., Yang J., Wan X. 2021, Seafloor Topography Estimation from Gravity Anomaly and Vertical Gravity Gradient Using Nonlinear Iterative Least Square Method. *Remote Sensing*, vol. 13, pp. 1–19. https://doi.org/10.3390/rs13010064

3. Silva J. B. C., Santos D. F., Gomes K. P. 2014, Fast gravity inversion of basement relief. *Geophysics*, vol. 79, issue 5, pp. G79–G91. https://doi.org/10.1190/GEO2014-0024.1
4. Pham L. T., Oksum E., Do T. D. 2018, GCH_gravinv: A MATLAB-based program for inverting gravity anomalies over sedimentary basins. *Computers & Geosciences*, vol. 120, pp. 40–47. https://doi.org/10.1016/j.cageo.2018.07.009
5. Cremon M., Burnham A. K., Liu Y., Lapene A. 2017, Modified Athy-Law Compaction to Account for Porosity Generation and Preservation from Kerogen Conversion in Terzaghi-Like Models of Petroleum Source Rocks. AAPG Annual Convention & Exhibition, Houston, Texas, April 2–5, 2017, article number 42062, pp. 1–18.
6. Wu L. 2018, Efficient Modeling of Gravity Fields Caused by Sources with Arbitrary Geometry and Arbitrary Density Distribution. *Surveys in Geophysics*, vol. 39, issue 3, pp. 401–434. https://doi.org/10.1007/s10712-018-9461-7
7. Santos D. F., Silva J. B. C., Martins C. M., Santos R. C. S., Ramos L. C., Araújo A. C. M. 2015, Efficient gravity inversion of discontinuous basement relief. *Geophysics*, vol. 80, issue 4, pp. G95–G106. https://doi.org/10.1190/geo2014-0513.1
8. Preston L., Poppeliers C., Schodt D. J. 2020, Seismic Characterization of the Nevada National Security Site Using Joint Body Wave, Surface Wave, and Gravity Inversion. *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 110, issue 1, pp. 110–126.
9. Wu L. 2016, Efficient modelling of gravity effects due to topographic masses using the Gauss–FFT method. *Geophysical Journal International*, vol. 205, no. 1, pp. 160–178. https://doi.org/10.1093/gji/ggw010
10. Wu L., Lin Q. 2017, Improved Parker's method for topographic models using Chebyshev series and low rank approximation. *Geophysical Journal International*, vol. 209, issue 2, pp. 1296–1325. https://doi.org/10.1093/gji/ggx093
11. Wu L. 2019, Fourier-domain modeling of gravity effects caused by polyhedral bodies. *Journal of Geodesy*, vol. 93, no. 5, pp. 635–653.
12. Mallesh K., Chakravarthi V., Ramamma B. 2019, 3D Gravity Analysis in the Spatial Domain: Model Simulation by Multiple Polygonal Cross-Sections Coupled with Exponential Density Contrast. *Pure and Applied Geophysics*, vol. 176, issue 5, pp. 2497–2511. https://doi.org/10.1007/s00024-019-02103-9
13. Stolk W., Kaban V., Beekman F., Tesauro M., Mooney W. D., Cloetingh S. 2013, High resolution regional crustal models from irregularly distributed data: Application to Asia and adjacent areas. *Tectonophysics*, vol. 602, pp. 55–68. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.01.022
14. Buccini A. 2016, Tikhonov-type iterative regularization methods for ill-posed inverse problems: theoretical aspects and applications. PhD thesis. Varese, Italy: University of Insubria.
15. Dadak B. 2017, Inversion of gravity data for depth-to-basement estimate using the volume and surface integral methods: model and case study. Salt Lake City, Utah, USA: The University of Utah, 84 p.
16. Maag E., Li Y. 2018, Discrete-valued gravity inversion using the guided fuzzy *c*-means clustering technique. *Geophysics*, vol. 83, issue 4, pp. 59–77. https://doi.org/10.1190/geo2017-0594.1
17. Feng X., Wang W., Yuan B. 2018, 3D gravity inversion of basement relief for a rift basin based on combined multinorm and normalized vertical derivative of the total horizontal derivative techniques. *Geophysics*, vol. 83, issue 5, pp. G107–G118. https://doi.org/10.1190/geo2017-0678.1
18. Cella F., Nappi R., Paoletti V., Florio G. 2021, Basement Mapping of the Fucino Basin in Central Italy by ITRESC Modeling of Gravity Data. *Geosciences*, vol. 11, pp. 1–25. https://doi.org/10.3390/geosciences11100398
19. Ren Z., Chen C., Pan K., Kalscheuer T., Maurer H., Tang J. 2017, Gravity Anomalies of Arbitrary 3D Polyhedral Bodies with Horizontal and Vertical Mass Contrasts. Surveys in Geophysics, vol. 38, issue 2, pp. 479–502. https://doi.org/10.1007/s10712-016-9395-x
20. Vatankhah S., Renaut R. A., Huang X., Mickus K., Gharloghi M. 2022, Large-scale focusing joint inversion of gravity and magnetic data with Gramian constraint. *Geophysical Journal International*, vol. 230, issue 3, pp. 1585–1611. https://doi.org/10.1093/gji/ggac138
21. Makled W. A., Ashwah A. A. E. E., Lotfy M. M., Hegazey R. M. 2020, Anatomy of the organic carbon related to the Miocene syn-rift dysoxia of the Rudeis Formation based on foraminiferal indicators and palynofacies analysis in the Gulf of Suez, Egypt. *Marine and Petroleum Geology*, vol. 111, pp. 695–719. https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2019.08.048
22. Abuzied S. M., Kaiser M. F., Shendi E.-A. H., Abdel-Fattah M. I. 2020, Multi-criteria decision support for geothermal resources exploration based on remote sensing, GIS and geophysical techniques along the Gulf of Suez coastal area, Egypt. *Geothermics*, vol. 88, article number 101893. https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2020.101893
23. Bendaoud A., Hamimi Z., Hamoudi M., Djemai S., Zoheir B. 2019, The Geology of the Arab World – An Overview. Cham: Springer, 552 p. https://doi.org/10.1007/978-3-319-96794-3
24. Temraz M., Dypvik H. 2018, The Lower Miocene Nukhul Formation (Gulf of Suez, Egypt): microfacies and reservoir characteristics. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, vol. 8, no. 1, pp. 85–98. http://dx.doi.org/10.1007/s13202-017-0386-3
25. Van Dijk J., AlBloushi A., Ajayi A. T., De Vincenzi L., Ellen H., Guney H., Holloway P., Khdhaouria M., Mcleod I. S. 2019, Hydrocarbon exploration and production potential of the gulf of Suez basin in the framework of the new tectonostratigraphic model. SPE Gas & Oil Technology Showcase and Conference, Dubai, UAE, October 2019. https://doi.org/10.2118/198622-MS
26. Attia I., Helal I., El Dakhakhny A., Aly S. A. 2017, Using sequence stratigraphic approaches in a highly tectonic area: Case study – Nubia (A) sandstone in southwestern Gulf of Suez, Egypt. *Journal of African Earth Sciences*, vol. 136, pp. 10–21. https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2017.06.001
27. Farouk S., Sen S., Pigott J., Sarhan M. A. 2022, Reservoir characterization of the middle Miocene Kareem sandstones, Southern Gulf of Suez Basin, Egypt. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, vol. 8, pp. 1–17. https://doi.org/10.1007/s40948-022-00437-8
28. Embabi A., Abdelwahhab M., Abdelhafez N. 2021, Reservoir characterization and petroleum geology at Esh El Mallaha Field, southern gulf of Suez, Egypt. *Al-Azhar Bulletin of Science*. vol. 32, no. 2, pp. 1–12. https://doi.org/10.21608/absb.2021.89127.1130
29. Hadad Y. T., Hakimi M. H., Abdullah W. H., Kinawy M., El Mahdy O., Lashin A. 2021, Organic geochemical characteristics of Zeit source rock from Red Sea Basin and their contribution to organic matter enrichment and hydrocarbon generation potential. *Journal of African Earth Sciences*, vol. 177, article number 104151. https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2021.104151
30. Said R. 2017, The geology of Egypt. 1st ed. Regional Geology Reviews. London, 734 p. https://doi.org/10.1201/9780203736678
31. Almalki K. A., Mahmud S. A. 2018, Gulfs of Suez and Aqaba: New insights from recent satellite-marine potential field data. *Journal of African Earth Sciences*, vol. 137, pp. 116–132. https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2017.10.004
32. Afifi A. S., Moustafa A. R., Helmy H. M. 2016, Fault block rotation and footwall erosion in the southern Suez rift: Implications for hydrocarbon exploration. *Marine and Petroleum Geology*, vol. 76, pp. 377–396. https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2016.05.029
33. Youssef M., El-Sorogy A., El-Sabrouty M., Al-Otaibi N. 2016, Invertebrate shells as pollution bio-indicators, Gebel El-Zeit area, Gulf of Suez. Egypt. *Indian Journal of Geo-Marine Sciences*, vol. 45, no. 5, pp. 687–695.
34. 2016, Ministry of Petroleum and Mineral Resources. Ganoub El-Wadi Petroleum Holding Company "Ganope". International Bid Round 2016, 1–7 p.
35. South H. [et al.]. 2009, The Source for Critical information and insight. Global Exploration & production service, Gulf of Suez south, Egypt. Status of Carto Data and IRIS21 databases, 1 p.
36. Aboud E., Salem A., Ushijima K. 2005, Subsurface structural mapping of Gebel El-Zeit area, Gulf of Suez, Egypt using aeromagnetic data. *Earth, Planets and Space*, vol. 57, pp. 755–760. https://doi.org/10.1186/BF03351854

The article was received on November 08, 2023

УДК 550.3+550.839+550.8.056+550.8.053 http://doi.org/10.21440/2307-2091-2024-1-7-32

Интеграция гравиметрических и скважинных данных для визуализации глубины и плотности трехмерной обратной модели глубинной структуры сложного фундамента, а также тектонических данных для дальнейшей разведки углеводородов в районе бассейна Эль-Зейт, юго-запад Суэцкого залива, Египет

Ахмед Гамаль Мохамед ХАССАН[1,2]
Карам Самир Ибрагим ФАРАГ[3]
Алаа Ахмед Фахми АРЕФ[2]
Алексей Лазаревич ПИСКАРЕВ[1]

[1]Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия
[2]Управление по ядерным материалам (УЯМ), Каир, Египет
[3]Университет Айн-Шамс, Каир, Египет

Аннотация

Актуальность работы. Соляные диапиры в осадочных толщах создают проблемы при интерпретации сейсмических данных в исследуемом регионе, тем самым препятствуя построению комплексной трёхмерной структуры центрального бассейна. Использование гравиметрических данных для исследования структуры блоков разломов фундамента, подстилающих осадочный бассейн в бассейне Гебель-эль-Зейт, расположенном в юго-западной части Суэцкого залива в Египте, считается настоятельно рекомендуемым методом для получения тектонических данных с целью изучения углеводородов в этой области.

Методы исследования. В настоящем исследовании используются гравитационные аномалии Буге для включения допущений модели латеральной плотности фундаментного комплекса с целью определения наилучшей трехмерной глубины фундамента для рассматриваемой территории. Предлагаемая методология использует последовательные методы трехмерной спектральной инверсии слоистой среды. Различные методологии прямой оптимизации и последовательности параметризации были протестированы с помощью Ольденбургской и других прямых моделей в процессе интеграции различных предположений о параметрах ограничений для управления процедурами инверсии.

Результаты и выводы. Предлагаемая трехэтапная схема гравитационной инверсии предназначена для обнаружения оптимального решения по глубине и плотности при минимизации несоответствия расчетных данных в максимально возможной степени. Путем определения соответствующих параметров для решения трехмерной модели глубины и плотности настоящее исследование применяет статистический анализ для определения рельефа фундамента и его сложного латерального распределения плотности. При нулевом региональном смещении гравитации и постоянном сдвиге не было выявлено срединной ошибки, что позволило оптимально ограничить модель латеральной плотности. Сопоставление данных по глубинам нескольких скважин стратиграфического контроля, пробуренных в инвертированной 3D-модели фундамента, продемонстрировало оптимальность рельефа фундамента на изучаемой территории. Результаты корреляционного анализа показывают, что ожидаемая и измеренная глубины наиболее соответствуют друг другу. Такая аппроксимация означает, что оптимально принимается латеральное распределение плотности комплекса фундамента, что приводит к минимальной ошибке расчета по глубине и указывает на высокую тектонику исследуемой территории и высокую вероятность захвата углеводородов.

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

Благодарности

Исследователь Ахмед Г. М. Хассан благодарен за финансовую поддержку, оказанную ему Арабской Республикой Египет, представленной в центральном отделе миссий при отделе по делам культуры и миссионерскому сектору Министерства высшего образования Египта, покрывающую его расходы на проживание во время учебы в Санкт-Петербургском государственном университете в России. Также он ценит возможность, предоставленную ему Российской

✉ahmed.gamal_88@hotmail.com

Федерацией в лице Министерства высшего образования России, поступления в аспирантуру. Программа по стипендии без оплаты за обучение.

Авторский вклад

Ахмед Г. М. Хассан: концептуализация, методология, программное обеспечение, формальный анализ, проверка, ресурсы, написание – подготовка оригинального проекта. Карам С. И. Фараг: формальный анализ, написание – рецензирование и редактирование, визуализация. Алаа А. Ф. Ареф: кураторство. Алексей Леонидович Пискарев: авторский надзор. Все авторы прочитали и согласились с опубликованной версией рукописи.

Раскрытие источников финансирования

Исследователь Ахмед Г. М. Хассан финансируется за счет стипендии [EGY-6958/16] в рамках совместной исполнительной программы Арабской Республики Египет и России.

Декларация о конкурирующих интересах

Авторы заявляют, что у них нет известных конкурирующих финансовых интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

ЛИТЕРАТУРА

1. Jessell M. et al. Next Generation Three-Dimensional Geologic Modeling and Inversion. Building Exploration Capability for the 21st Century. Chapter 13. Karen D. Kelley and Howard C. Golden (eds). Littleton, Colorado, USA: Society of Economic Geologists, 2014. P. 261–272. https://doi.org/10.5382/SP.18.13
2. Fan D., Li S., Li X., Yang J., Wan X. Seafloor Topography Estimation from Gravity Anomaly and Vertical Gravity Gradient Using Nonlinear Iterative Least Square Method // Remote Sensing. 2021. Vol. 13. P. 1–19. https://doi.org/10.3390/rs13010064
3. Silva J. B. C., Santos D. F., Gomes K. P. Fast gravity inversion of basement relief // Geophysics. 2014. Vol. 79. No. 5. P. G79–G91. https://doi.org/10.1190/geo2014-0024.1
4. Pham L. T., Oksum E., Do T. D. GCH_gravinv: A MATLAB-based program for inverting gravity anomalies over sedimentary basins // Computers & Geosciences. 2018. Vol. 120. P. 40–47. https://doi.org/10.1016/j.cageo.2018.07.009
5. Cremon M., Burnham A. K., Liu Y., Lapene A. Modified Athy-Law Compaction to Account for Porosity Generation and Preservation from Kerogen Conversion in Terzaghi-Like Models of Petroleum Source Rocks // AAPG Annual Convention and Exhibition. 2017. Article number 42062. P. 1–18.
6. Wu L. Efficient Modeling of Gravity Fields Caused by Sources with Arbitrary Geometry and Arbitrary Density Distribution // Surveys in Geophysics. 2018. Vol. 39. Issue 3. P. 401–434. https://doi.org/10.1007/s10712-018-9461-7
7. Santos D. F., Silva J. B. C., Martins C. M., Santos R. C. S., Ramos L. C., de Araújo A. C. M. Efficient gravity inversion of discontinuous basement relief // Geophysics. 2015. Vol. 80. No. 4. P. G95–G106. https://doi.org/10.1190/geo2014-0513.1
8. Preston L., Poppeliers C., Schodt D. J. Seismic Characterization of the Nevada National Security Site Using Joint Body Wave, Surface Wave, and Gravity Inversion // Bulletin of The Seismological Society of America. 2020. Vol. 110. No. 1. P. 110–126. http://dx.doi.org/10.1785/0120190151
9. Wu L. Efficient modelling of gravity effects due to topographic masses using the Gauss–FFT method // Geophysical Journal International. 2016. Vol. 205. Issue 1. P. 160–178. https://doi.org/10.1093/gji/ggw010
10. Wu L., Lin Q. Improved Parker's method for topographic models using Chebyshev series and low rank approximation // Geophysical Journal International. 2017. Vol. 209. Issue 2. P. 1296–1325. https://doi.org/10.1093/gji/ggx093
11. Wu L. Fourier-domain modeling of gravity effects caused by polyhedral bodies // Journal Of Geodesy. 2019. Vol. 93. Issue 5. P. 635–653. http://dx.doi.org/10.1007/s00190-018-1187-2
12. Wu L., Lin Q. Improved Parker's method for topographic models using Chebyshev series and low rank approximation // Geophysical Journal International. 2017. Vol. 209. Issue 2. P. 1296–1325. https://doi.org/10.1093/gji/ggx093
13. Stolk W., Kaban M., Beekman F., Tesauro M., Mooney W. D., Cloetingh S. 2013, High resolution regional crustal models from irregularly distributed data: Application to Asia and adjacent areas // Tectonophysics. Vol. 602. No. 6. P. 55–68. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.01.022
14. Buccini A. Tikhonov-type iterative regularization methods for ill-posed inverse problems: theoretical aspects and applications: PhD thesis. Varese, Italy: Università degli Studi dell'Insubria, 2016.
15. Dadak B. Inversion of gravity data for depth-to-basement estimate using the volume and surface integral methods: model and case study. Salt Lake City, UT, USA: The University of Utah, May, 2017. 92 p.
16. Maag E., Li Y. Discrete-valued gravity inversion using the guided fuzzy *c*-means clustering technique // Geophysics. 2018. Vol. 83. Issue 4. P. 1–115. http://dx.doi.org/10.1190/geo2017-0594.1
17. Feng X., Wang W., Yuan B. 3D gravity inversion of basement relief for a rift basin based on combined multinorm and normalized vertical derivative of the total horizontal derivative techniques // Geophysics. 2018. Vol. 83. Issue 5. P. G107–G118. https://doi.org/10.1190/geo2017-0678.1
18. Cella F., Nappi R., Paoletti V., Florio G. Basement Mapping of the Fucino Basin in Central Italy by ITRESC Modeling of Gravity Data // Geosciences. 2021. Vol. 11. No. 10. P. 1–25. https://doi.org/10.3390/geosciences11100398
19. Ren Z., Chen C., Pan K., Kalscheuer T., Maurer H., Tang J. Gravity Anomalies of Arbitrary 3D Polyhedral Bodies with Horizontal and Vertical Mass Contrasts // Surveys In Geophysics. 2017. Vol. 38. No. 2. P. 479–502. https://doi.org/10.1007/s10712-016-9395-x
20. Vatankhah S., Renaut R. A., Huang X., Mickus K., Gharloghi M. Large-scale focusing joint inversion of gravity and magnetic data with Gramian constraint // Geophysical Journal International. 2022. Vol. 230. Issue 3. P. 1585–1611. https://doi.org/10.1093/gji/ggac138
21. Makled W. A., Ashwah A. A. E. E., Lotfy M. M., Hegazey R. M. Anatomy of the organic carbon related to the Miocene syn-rift dysoxia of the Rudeis Formation based on foraminiferal indicators and palynofacies analysis in the Gulf of Suez, Egypt // Marine and Petroleum Geology. 2020. Vol. 111. P. 695–719. https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2019.08.048
22. Abuzied S. M., Kaiser M. F., Shendi E.-A. H., Abdel-Fattah M. I. Multi-criteria decision support for geothermal resources exploration based on remote sensing, GIS and geophysical techniques along the Gulf of Suez coastal area, Egypt // Geothermics. 2020. Vol. 88. Article number 101893. https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2020.101893
23. The Geology of the Arab World – An Overview. Bendaoud A., Hamimi Z., Hamoudi M., Djemai S., Zoheir B. (eds). Berlin: Springer, 2019. 560 p.
24. Temraz M., Dypvik H. The Lower Miocene Nukhul Formation (Gulf of Suez, Egypt): microfacies and reservoir characteristics // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. 2018. Vol. 8. No. 1. P. 85–98. https://doi.org/10.1007/s13202-017-0386-3
25. Van Dijk J., AlBloushi A., Ajayi A. T., De Vincenzi L., Ellen H., Guney H., Holloway P., Khdhaouria M., Mcleod I. S. Hydrocarbon exploration and production potential of the Gulf of Suez Basin in the framework of the new tectonostratigraphic model. SPE Gas & Oil Technology Showcase and Conference (October 21–23, 2019 Dubai, UAE). 2019. Article number SPE-198622-MS. https://doi.org/10.2118/198622-MS

26 Attia I., Helal I., El Dakhakhny A., Aly S. A. Using sequence stratigraphic approaches in a highly tectonic area: Case study – Nubia (A) sandstone in southwestern Gulf of Suez, Egypt // Journal of African Earth Sciences. 2017. Vol. 136. P. 10–21. https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2017.06.001
27. Farouk S., Sen S., Pigott J. D., Sarhan M. A. Reservoir characterization of the middle Miocene Kareem sandstones, Southern Gulf of Suez Basin, Egypt // Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources. 2022. Vol. 8. No. 5. P. 1–17. https://doi.org/10.1007/s40948-022-00437-8
28. Embabi A. M., Abdelwahhab M. A., Abdelhafez N. A. Reservoir characterization and petroleum geology at esh el Mallaha field, southern Gulf of Suez, Egypt // Al-Azhar Bulletin of Science. 2021. Vol. 32. No. 2. P. 1–12. https://doi.org/10.21608/absb.2021.89127.1130
29. Hadad Y. T., Hakimi M. H., Abdullah W. H., Kinawy M., El Mahdy O., Lashin A. Organic geochemical characteristics of Zeit source rock from Red Sea Basin and their contribution to organic matter enrichment and hydrocarbon generation potential // Journal of African Earth Sciences. 2021. Vol. 177. Article number 104151. https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2021.104151
30. The geology of Egypt: Regional Geology Reviews. R. Said (ed.), 2017. 734 p. https://doi.org/10.1201/9780203736678
31. Almalki K. A., Mahmud S. A. Gulfs of Suez and Aqaba: New insights from recent satellite-marine potential field data // Journal of African Earth Sciences. 2018. Vol. 137. P. 116–132. https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2017.10.004
32. Afifi A. S., Moustafa A. R., Helmy H. M. Fault block rotation and footwall erosion in the southern Suez rift: Implications for hydrocarbon exploration // Marine and Petroleum Geology. 2016. Vol. 76. P. 377–396. https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2016.05.029
33 Youssef M., El-Sorogy A., El-Sabrouty M., Al-Otaibi H. Invertebrate shells as pollution bio-indicators, Gebel El-Zeit area, Gulf of Suez, Egypt // Indian Journal of Geo-Marine Sciences. 2016. Vol. 45. No. 5. P. 687–695.
35. Ministry of Petroleum and Mineral Resources. Ganoub El-Wadi Petroleum Holding Company “Ganope”. International Bid Round 2016. 2016. P. 1–7.
35. South H. et al. The Source for Critical information and insight. Global Exploration & production service, Gulf of Suez south, Egypt. Status of Carto Data and IRIS21 databases. 2009.
36. Aboud E., Salem A., Ushijima K. Subsurface structural mapping of Gebel El-Zeit area , Gulf of Suez, Egypt using aeromagnetic data // Earth, Planets and Space. 2005. Vol. 57. P. 755–760. http://dx.doi.org/10.1186/BF03351854

Статья поступила в редакцию 08 ноября 2023 года

UDC 550.839 http://doi.org/10.21440/2307-2091-2024-1-33-76

Geo-petrophysical analysis of hydrocarbon in the Douala Campo basin, Cameroon

Bareja YOUMSSI TICHOUE[1*]
Valentina Mikhailovna USOVA[2**]
Sixtus NTEH[1***]
Elena Mikhailovna KOTEL'NIKOVA[2****]

[1]The University of Bamenda, Bamenda, Cameroon
[2]Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow, Russia

Abstract

The relevance of the work. Well-log analysis and 3D seismic method are combined to evaluate the nature of fluids and reservoir characteristics in the Douala-Campo basin (DC). Scientific research that exhibit the important geologic and geophysical settings of this basin is lacking.

The purpose of the work. The successful investigation of these areas is possible if the stratigraphic and petrophysical properties of the reservoir are properly evaluated.

Research methodology. Extracting facies types from 3D seismic sections is a rapidly evolving discipline that facilitates the development of reservoir prediction models. Therefore, a 25 m x 25 m seismic grid associated with Gamma-Ray log (GR), Neutron (Nphi) log, resistivity log, sonic log, and density (RHOB) log have been performed.

Results and Conclusions. The results highlight the sedimentary environment and facies, porous-permeable clay banks, clay content, porosity, saturation and the nature of the fluids in the reservoir. The petrophysical evaluations indicate potential petroleum reservoirs, mainly sandy-clay with 3.81–29.47% volume, 17.37–27.85% porosity and 27.74–56.02% water saturation. The fluids present in the reservoir is oil, gas and water. This research will encourage hydrocarbon (HC) exploration in the DC Basin by adopting strategies in which seismic stratigraphy combined with well data will be the most likely means of providing drilling targets for more independent operators. The results of this study will serve future prospectors in the neighbouring oil and gas fields of our study area. Significant advances have been made to ensure future exploration success.

***Keywords*:** 3D seismic, Reservoir, Well log, Petrophysical parameters, DC.

Introduction

As a result of the separation of the African and South American tectonic plates, the opening of the South Atlantic (from the Berriasian to the Upper Aptian) began in the early Cretaceous as a gradual diachronic North-South process [1, 2]. Due to a marine incursion, this opening introduced a range of salt basins, giving rise to various basins: Namibia, Benguela and Cuenza (Angola), Douala-Campo (DC), Namibia, Rio Del Rey (RDR) (Cameroon), and Rio Muni (Gabon/Equatorial Guinea) [3]. The volcanic line marks the edge between the two coastal basins for Cameroon. The RDR basin is the southern extension of the Niger Delta, while the DC basin develops along the Gulf of Guinea [4]. Cameroon seeks to increase its production in hydrocarbon by promoting several oil field block in the Douala-Campo basin (DC) basin. The exploration of new hydrocarbon reserves is known to be expensive, so it is necessary to use low-cost methods to locate and quantify these reservoirs within the limitations of geological models. The derivation of stratigraphic insights from seismic data has its origins in the early 1970's with the advent of improved 2D seismic data. The discipline of seismic stratigraphy traces its roots to the landmark publication of AAPG Memoir 26, which summarized the work of Peter Vail and his colleagues at Exxon Production Research Company [5]. The seismic expression of stratigraphic features in a 3D seismic cube depends on which way the data volume is being viewed; vertical transect or horizontal map view [6].

Well-logging data can accurately detect reservoir fluid volume and composition, if interpreted correctly and ideally calibrated to core data [7–13]. Gamma logs are used to reveal lithology such as shale beds. Similarly, gamma logs are used to identify other lithology such as dolomites and limestone when available from core data. Resistivity logging is used to discern water and hydrocarbons in reservoir rock interstices. It can be used to determine the oil-water contact and the true resistivity of the formation [14]. Hydrocarbons are encountered in ecological traps,

✉youmssi@mail.ru
** usova-vm@rudn.ru
https://orcid.org/0000-0002-0023-5913
***ntehsixtus@gmail.com
****kotelnikova-em@rudn.ru
https://orcid.org/0000-0001-8909-8953

which may be stratigraphic, structural, or a combination of both. Most traps in the Niger Delta, according to Doust and Omatsola (1990) are structural [15]. Oil drilling is an expensive undertaking, especially as supplies of hydrocarbons decline. Undiscovered deposits are located in intricate geological environments, so capitalizing on new developments is essential [16]. Keys to quantifying producible hydrocarbons are reservoir characteristics, in particular the water saturation thickness, reservoir, porosity and zone extent (Schlumberger, 1998). Information on these parameters is relevant and serve as input data for the volumetric analysis of the reservoir, i.e. the volume of hydrocarbons in place [17]. Many oil wells drilled in the DKC basin based on 2D seismic data have failed due to poor reservoir quality, and according to the drilling completion reports, these wells may not have been optimally positioned with respect to the reservoir target. This study aims to determine the nature of the hydrocarbons and to characterize the reservoirs in the study area. This is achieved by identifying the nature of the fluids, the potential reservoirs and by estimating petrophysical parameters from well logs. This research will encourage hydrocarbon (HC) exploration in the DC Basin by adopting strategies in which seismic stratigraphy combined with well data will be the most likely means of providing drilling targets for more independent operators [18–20]. The results of this study will serve future prospectors on the neighbouring oil and gas fields of our study area. Significant advances have been made to ensure future exploration success in the DKC basin of Cameroon.

Location and geology of the study area

The DKC basin is located between 9°04'–10°04' East longitude and 2°18'–4°32' North latitude (Fig. 1). The DKC basin encompasses an area of 19,000 km^2. The DKC Basin is divided into two sub-basins, one in the south, the Kribi-Campo Sub-basin, and one in the north, the Douala Subbasin [21]. Hydrocarbon exploration in the DKC basin began in the fifties at the onshore portion. The offshore part of this basin was explored in the 1960s and was primarily concentrated in the shallow water Kribi-Campo sub-basin, targeting the inclined cretaceous fault provinces that extend to onshore where oil derived from the Cretaceous formation is currently produced [21]. The Douala basin geology history begins in the Lower Cretaceous with the discontinuity that separates Africa and South American continents. The formation of the first deposits of the lower Mundeck formation begins the filling of the basin during this initial rift phase [22, 23]. This filling starts with the Aptian in the Douala sub-basin and the Barremian in the Kribi-Campo sub-basin [23, 24]. Lower Mundeck continental deposits include sandstone (base sandstone), dark gray shale clay, organic-rich marl, thin limestone beds, and conglomerate [25]. Toward the end of the Aptian, during a transition period, the first marine incursions produced a salifer series that spread from Cameroon to Angola [26]. There are three separation intervals from the Albian to the current, during which a passive margin was formed by the accumulation of sedimentary deposits in discrepancy, separated by cuts caused by orogenesis phases [25, 27].

The significant marine transgression of the Drift I phase in Albien results in the formation of the upper Mundeck layers, which are composed of sandstone, argillite, organic clay, and carbonate past. This succession usually ends with the " Cenomanian discordance", which is the result of the start of

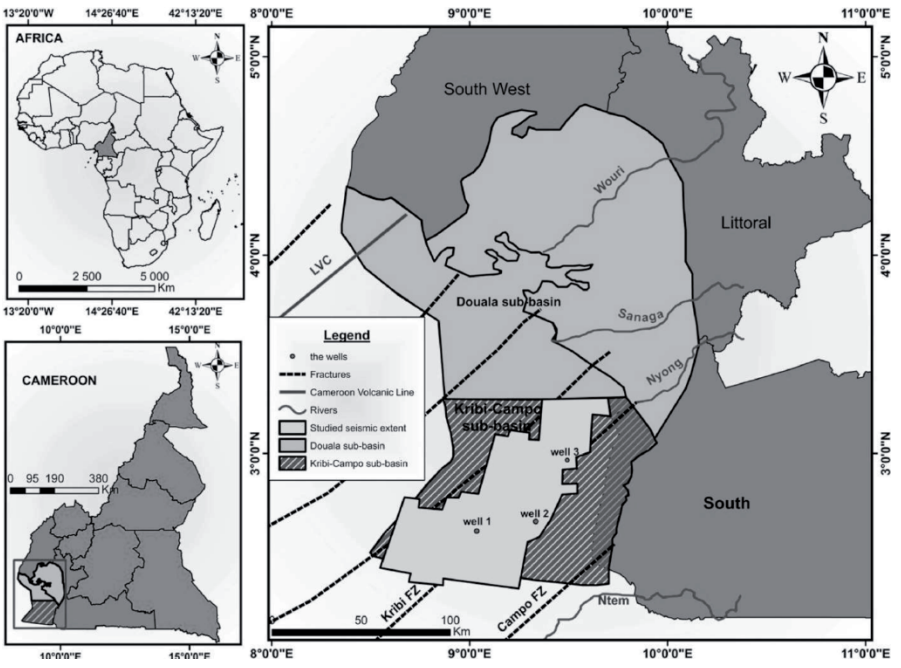


Figure 1. Location map indication the seismic grid extent and well log position

Рисунок 1. Карта местоположения с указанием протяженности сейсмической сетки и положения каротажных диаграмм

a regression that continues to the Turonian [28]. The Drift II phase, which is linked to the Santonian's Tectonian episode, is separated from Phase I (Drift I) by a discontinuity caused by this event. Following the latter, the formation of Logbadjek, made of micro-conglomerate, sand, middle sandstone to rude and rare limestone and clay intercalates, already begins in the Santonian and continues at the lower campanien. The thick formation of logbaba formed of sediments sailors of deep-sea water follows in this one, in the upper campanien and the Maastrichthen. These sediments are made up of fossilized argillitis with sand levels and sandstone [4, 22]. The Mastrichtic Terminal and Danian gap highlight the Cretaceous Passage-Tertiary in all Western African basins. Tertiary sedimentation in the Douala Basin begins with the filing of NKAPA training by simple subsidence of the passive margin. This lower Paleocene-Eocene formation is composed of silt, sand lentils, dolomite, clay literate, argillite, and fine friable sandstone with coarse [4, 29].

During the Eocene, sedimentation is abruptly halted by a major episode of medium tertiary lifting, resulting in the great stratigraphic gap of lower higher-oligocene Eocene. The Songlaba formation, oligoMiocene, produces a subsidence and beginner at the same time as the Drift III phase at the end of the Oligocene [27]; it is characterized by marls, sandstones, silts, and clays with interstracted sand lentils and occasionally shell limestones. The Cenozoic series concludes with the formations of Matanda (Pliocene) and Wouri (Pleistocene) made of fine sand in rough, clay, and volcanic tufa after a final stratigraphic gap at the end of the Miocene.

Seven formations (Fig. 2) were described in the Douala sub-basin based on the previous works [3, 22–24, 27, 30]. Mundeck formation is the oldest to the most recent. The term "Mundeck Formation" refers to the lower Cretaceous Age Section of the Sismic discordance [31]. This formation is the oldest, dated C´enomanian [23, 31], and it is located in the precarambrian base discrepancy. It is located in the Moungo Valley, near Mundeck, in the northern part of the Douala sub-basin. Mundeck is made up of continental and fluvio-deltaic deposits with some marine facies intercalates [23]. It is a thick layer composed of base elements, medium to coarse sandstone, micaceous fine sandstone, carbonneous and carbonate, black shale micas, argilites, limestones, and marls [4, 32].

The logbadjeck formation is in concordance or discordance with the Mundeck formation, as a result of Turonian regression and the erosion of the base and basic sandstone. It is made up of microconglomerates, sands, rough medium sandstones, fossiliferous limestone and sandy clay intercalations, sandstone, and marn-limestone intercalates [4]. It has been eroded to the east due to Turonian flexuration. The formation of logbadjeck from the outcrop is well represented in the Moungo Valley, where it represents deposits of the basin's external platform. Logbajeck's formation is dated as Cenomanian and Campanian [4, 33, 34]. Sedimentation is primarily fluvio-deltaic at the base. The Formation of logbaba is a thick sedimentary layer dominated by argillites, with a summit characterized by an upper Cretaceous discrepancy [4].

The logbaba formation sediments are marine, deposited in deep water with rapid landfill, a feature of the development of West African basins with deepwater argilites. This field is made up of sandstones, sands, and fossilized argillitis [4, 22]; it is Campanien-Maastrichthen dated [4, 31].

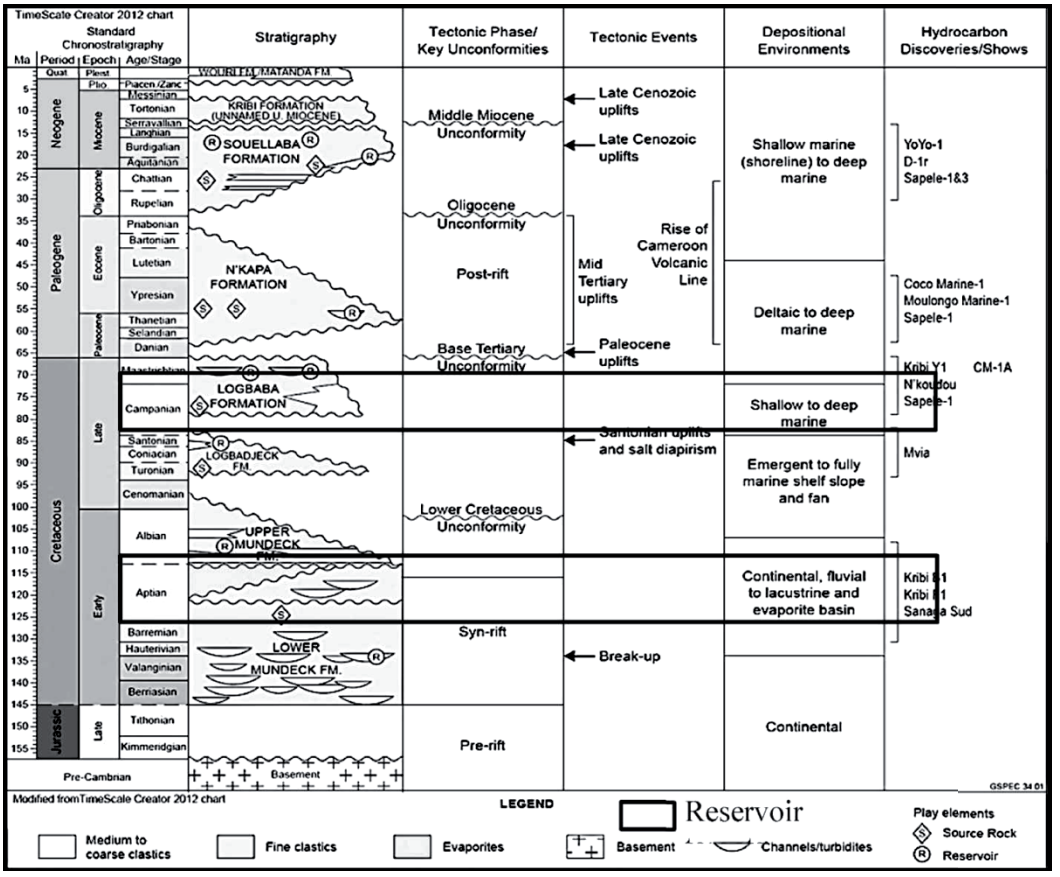


Figure 2. Lithostratigraphy of DC basin [33]
Рисунок 2. Литостратиграфия бассейна ДК [33]

The Nkapa formation is underlain by Cenozoic unconformities, indicating Tertiary sedimentation by passive margin subsidence. Its formation comes to an end abruptly in the Middle Eocene after a major episode of uplift and erosion of the African margin. The Nkapa Formation, which separates from the Logbaba Formation to the east and southeast of the sub-basin, is heavily eroded. It can be seen in the Moungo Valley outside the outcrop [35]. It is composed of shales, calcareous clays, arkosic sandstones, fine friable sandstones with crusts, silts, sands, and dolomitic lenses and is of Lower Paleocene age [4, 29]. Logar (1983) describes the deposit context as a coexistence of continental and marine environments. From a coastal clay-silt environment, the environment evolves to the south towards a more marine environment marked by turbidite sandy deposits [4].

The formation of Songelaba is the result of subsidence and resumption of sedimentation following the important phase of lifting and erosion responsible for the large stratigraphic gap of the higher Eocene [21, 23, 35]. Because of the erosion of upper ecene and lower oligocene sediments, the formation of Songelaba is dated higher-miocene lower Oligocene [23, 36]. It is distinguished by marls and lentils of interstracted sands in intercalation [4, 22] and, on rare occasions, by shell limestone [31]. Clays cover the transgressive sandstones and silts that dominate the lower part. Matanda (Superior-Pliocene Miocene) formation is dominated by interstratified deltaic facies and volcanic tuffs [4, 22]. These are coarse sands that begin at the bottom and end at the top, alternating with pockets of clays that are occasionally intersected with basalttes [37].

Matanda formation dumped in Tiko and the Douala basin's coastal area.

The Wouri (Pliocene-Pleistocene) formation is distinguished by coarse gravel and gravel with clay matrix [4]. There is often evidence of lava and volcanic tufas. Wouri sediments are the result of estuarine sedimentation at the mouths of the Wouri and Dibamba rivers.

Materials and methods

The evaluation of the oil potential of the southern part of the DKC basin is carried out through the analysis of conventional 3D seismic and well log data. The 3D seismic database investigated is located in offshore part. A 25 m × 25 m grid-oriented NS-EW was generated and two vertical wells namely P1 and P2 have been used for well log recording. Seismic data analysis involved coordinate conversion, data loading, well to seismic tie using synthetic seismogram, horizon and facies illustration, amplitude map generation [38].

Seismic calibration is done using two logs (sonic, density) and checkshots. The sonic is first calibrated, then the multiplication of the sonic and the density will generate the acoustic impedance and the coefficient of reflectivity. This will then be convoluted to an appropriate wavelet extracted from the seismic to generate the synthetic seismogram. It will subsequently make to better find the time-depth correspondences or to better correlate.

After seismic calibration, therefore come the seismic interpretation. The method used is manual picking and semi-automatic tracking [39]. It is a completely manual operation which aims to point at an object of interest using the desktop mouse and the tracking is both manual and software assisted. At each point, the software researches similar information (polarity, amplitude and similar frequency) between the different points, respecting the principles of stratigraphy. The different points will thus be joined to allow obtaining a horizon at the end of the process. Then the amplitude map was generated.

The main logs used for this study are the Gamma-Ray log (*GR*) which allowed us to delineate the porous-permeable clay banks and estimate the clay content in each reservoir; the Neutron log (Nphi) in combination with the density log (RHOB), this log allowed us to determine the porosity of the formations and to reconstruct the lithology crossed by each well; the density log (RHOB) allow us to identify the fluids in the reservoirs and to locate the gas/oil and oil/water contacts in comparison with the neutron and resistivity logs; and resistivity logs allowed us to calculate saturations and determine the nature of the fluids.

The petrophysical assessment can be classified into two successive stages: Qualitative assessment: Quick look analysis and Quantitative evaluation (single-plot analysis).

This method of rapid interpretation of logs developed by Serra (1979) allows a qualitative analysis, which requires practically no calculation, mainly using the comparison of logs with each other by superposition. This evaluation method is subdivided into two stages [40]:

– Identification of lithology, the method used is the cutting of the logs into electrofacies zone by highlighting the different polarities and allows to delimit the possible zones of being reservoirs; to do this we look at the positions of the neutron log (Nphi) and the density log (RHOB);

– Determination of porosity and type of hydrocarbon, a certain number of conditions must be fulfilled for the determination of these parameters.

The single-plot analysis it is an analysis that provides information on the petrophysical parameters (shale volume, porosity, saturation, permeability, etc.). In order to interpret measurements quantitatively, the electrical resistivities measured depend on the natural geological conditions and the action of the drilling fluids used. It is important to bring the various resistivities to the temperature of the formation considered, for this it is necessary successively to determine the petrophysical parameters such as: the volume of shale (V_{sh}) by using Eq. (1); the effective porosity (PhiE) and water saturation (S_w).

Table 1. Petrophysical parameters of reservoir in well P1
Таблица 1. Петрофизические параметры пласта в скважине P1

Reservoirs	Depth, m, TVD	Thickness, m	V_{sh}, %	PhiE, %	S_w, %	Lithology	Natural fluids
R1	3831–3945	114	15.3	24.85	53.98	Sandy shale	Gas
R2	4072–4105	33	5.04	19.06	55.91	Sand	Oil
R3	4235–4305	70	7.87	18.97	54.91	Sand	Oil
R4	4323–4431	108	3.81	20.81	54.03	Sand	Oil
R5	4463–4549	86	7.36	18.05	56.02	Sand	Oil

To achieve the objectives, we carried out the following steps: (*i*) Sampling of the number of electrofacies, (*ii*) Identify the roofs and bases of the reservoirs selected, (*iii*) Then proceed to the calculation of the petrophysical parameters, (*iv*) Determination of the volume of shale from the *GR* [41]. Prior to these tasks, the baseline of the sand and shale needs to be calibrated taking the average of the log *GR*

$$V_{sh} = I_{GR} = \frac{GR_{read} - GR_{min}}{GR_{max} - GR_{min}}, \quad (1)$$

where GR_{read} is the *GR* value of the bank read directly from the log; GR_{min} is the minimum *GR* value of the same bank; GR_{max} is the maximum *GR* value of the same bank, all of them in the API unit. I_{GR} is the Gamma ray radiation index and V_{sh} is the Volume of shale;

– Determination of the porosity: Log Rhob calibration: The log Rhob must be calibrated according to the shale peak and then calculate the effective porosity (PhiE) using the standard formula [42]. The porosity density is obtained from Wyllie's Eq. (2)

$$\varnothing_D = \frac{\rho_b - \rho_{ma}}{\rho_f - \rho_{ma}}, \quad (2)$$

where $\varnothing_D$ is the overall density read opposite the given study level in, g/cm^3; $\rho_b, \rho_f, \rho_{ma}$ are the density of the matrix, the fluid density and the porosity given by density tools respectively.

Alongside this density porosity, the porosity is determined by the "Quick look" method, which combines neutron and density logs porosity $(\varnothing_N, \varnothing_D)$. The total $\varnothing_T$ and effective porosity $\varnothing_e$ are plotted by the following Eq. (3) and (4):

$$\varnothing_T = \frac{\varnothing_N - \varnothing_D}{2}, \quad (3)$$

and

$$\varnothing_e = \varnothing_T (1 - V_{sh}). \quad (4)$$

Neutron log calibration: this involves bringing the log neutron back to the shale peak and reading the corresponding value;

– Determination of water saturation:

Prior to this, we must first configure the calculation formula, the one used in our work is "Dual Water", this is a formula developed by the Americans [43] and it turns out to be proportional to our environment (sandy shale). Next, you have to calibrate the density and the volume of shale previously calculated from the GR, and finally determine the matrix parameters (*a*, *n* and *m*) used in the Archie Eq. (5).

$$\frac{1}{R_t} = \frac{\varnothing_T^m S_{wT}^n}{aR_w}\left(1 + \frac{BQV_n}{S_{wT}}\right), \quad (5)$$

with $QV_n = \frac{V_{sh}\varnothing_{sh}}{\varnothing_T}$; S_{wT} – Total water saturation; V_{sh} – Volume of clay; $\varnothing_{sh}$ – Clay porosity; *a* – Formation factor; *n* – Saturation exponent, which can vary between 1.2–2.2; *m* – Cementation factor.

Due to the water saturation, S_w, it will be possible to determine the hydrocarbon saturation in the virgin zone S_{hc} with the following Eq. (6):

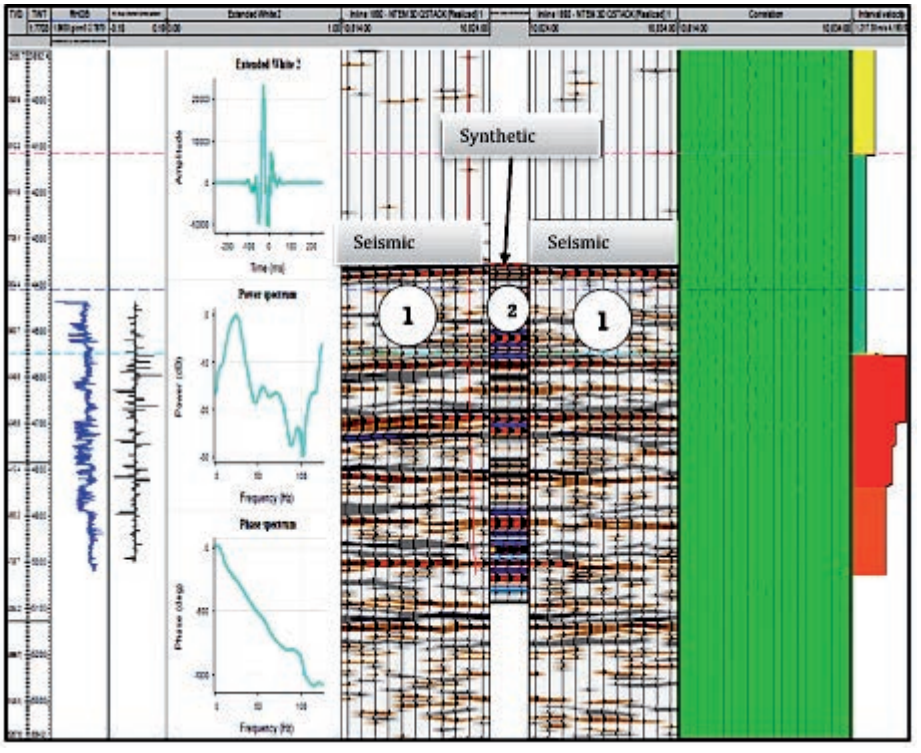


Figure 3. Synthetic seismogram generated by the checkshot and sonic log data in well P1
Рисунок 3. Синтетическая сейсмограмма, полученная по данным контрольного и акустического каротажа в скважине P1

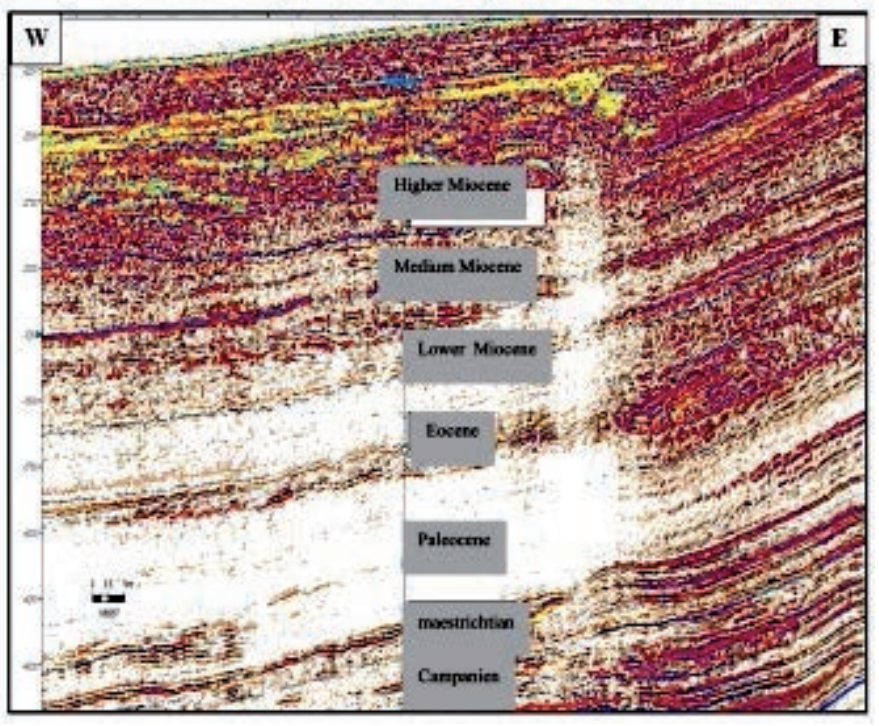


Figure 4. Visualisation of well on the seismic profile
Рисунок 4. Визуализация скважины на сейсмическом профиле

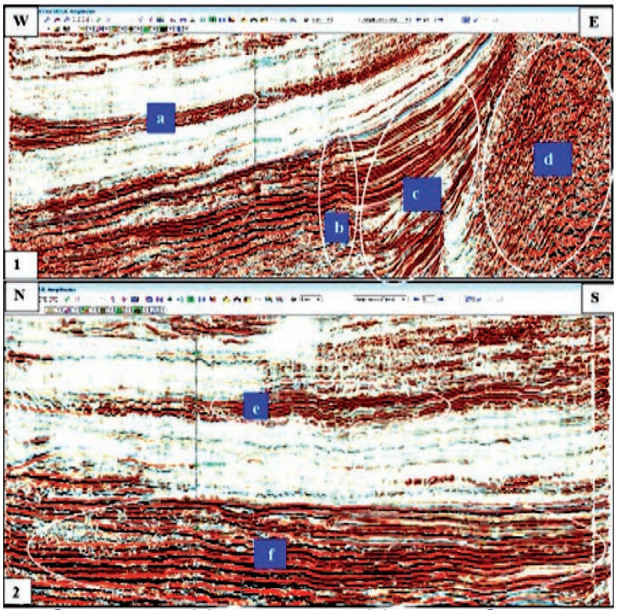


Figure 5. Inline (*1*) and crossline (*2*) indicating facies
Рисунок 5. Прямая (*1*) и перекрестная линия (*2*) с указанием фаций

$$S_{hc} = 1 - S_w; \quad (6)$$

– Nature of fluids determination.

It is noted that, in the oil-bearing reservoir, *GR* and Density-Neutron all deflect to the left. Only resistivity deflects to the right. *GR* reads lower due to lower radioactivity of Th, K and U. Resistivity responds to non-conducive hydrocarbon, giving higher resistivity. Density-Neutron reads higher porosity in reservoir.

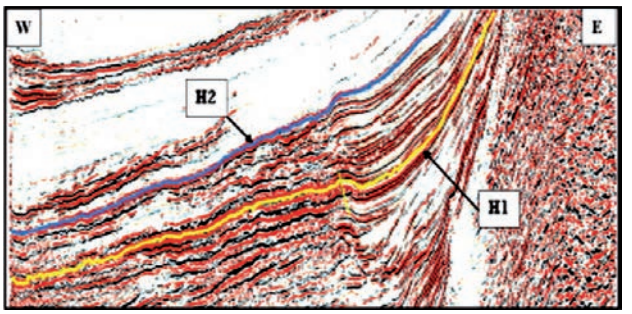


Figure 6. Seismic profile showing the interpreted horizons (H1 and H2)
Рисунок 6. Сейсмический профиль, показывающий интерпретированные горизонты (H1 и H2)

In the gas reservoir, *GR* deflects to the left; Resistivity, right; Density left; and Neutron, right. *GR* reads lower due to lower radioactivity of Th, K and U. Resistivity responds to non-conducive hydrocarbon, giving higher resistivity. Density gives lower bulk density due to lower gas density. Neutron reads low apparent low porosity in gas zone due to lower neutron-hydrogen interactions in gas as compared to neutronhydrogen interactions in water. The use of petrophysical cutoffs for net pay demarcation are as follow: $Gr_{cutoff} = < 0.45$; $PhiE_{cutoff} => 0.1$; $S_{w\,cutoff} = 0.70$.

Results and discussion

1. Seismic well tie result

Fig. 3 above shows the synthetic seismogram generated by the check shoot and sonic log data in well P1. The numbers represent the seismic traces. In 1, we observe the original seismic traces obtained after processing the signals; in 2, it is a synthetic trace generated after calibration. This seismogram allowed us to set the reflectors in the depth range where the logs were recorded. The correlation coefficient between seismic

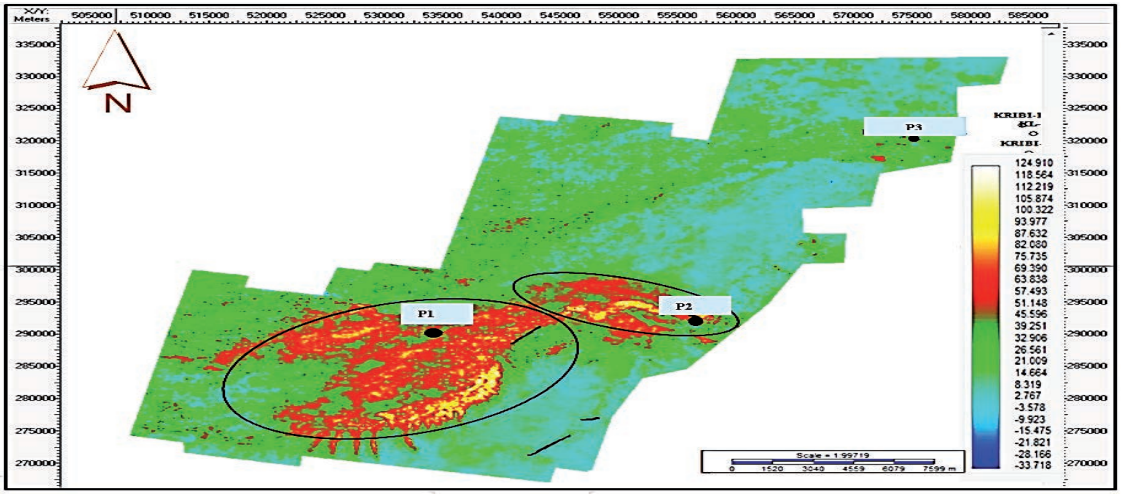


Figure 7. Amplitude (ms) map of the H1 horizon, indicating potential sand accumulation in the areas of high amplitude
Рисунок 7. Карта амплитуды (мс) горизонта H1, показывающая потенциальное скопление песка в областях высокой амплитуды

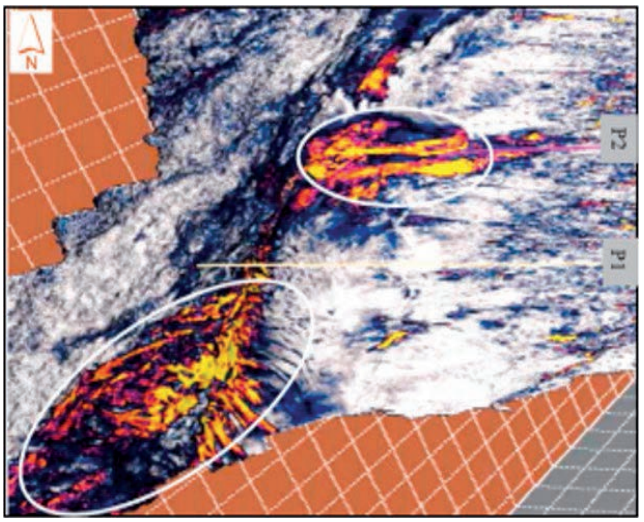


Figure 8. RMS amplitude map (H1) generated on 3D coherence attribute
Рисунок 8. Карта среднеквадратичных амплитуд (H1), созданная на основе трехмерного атрибута когерентности

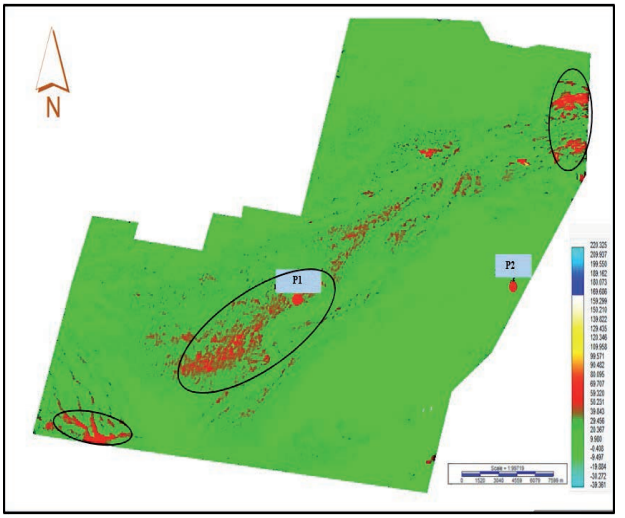


Figure 9. Amplitude (ms) map of the H2 horizon, indicating potential sand accumulation in the areas of high amplitude
Рисунок 9. Карта амплитуд (мс) горизонта H2, указывающая на возможное скопление песка в областях повышенного содержания песка

trace and synthetic trace at the point of intersection obtained at the end of this setting is greater than 0.65, i. e. 65%, the setting of the seismic horizons in time using the data from the P1 well was a success. However, we can note small differences between the amplitudes observed on the surface seismic and synthetic trace. This difference is explained by the choice of amplitude compensation laws used for the two types of data. For this purpose, we can visualize the well on our seismic profile converted to depth (Fig. 4).

2. Seismic interpretation profiles

In the inline profile, we observe four facies represented by the letters a, b, c and d (Fig. 5). The discontinuous facies (a): which are linked to small systems of slightly spaced normal faults, known as "polygonal fault systems". Polygonal faults have been observed along the West African margin, off Angola [44] and in Namibia. They can also be seen on the Crossline profile represented by the letter (e); The monoclinal facies (b): are generally linked to deep water channels controlled by high turbidity currents. The individual mounds are characterized by a continuous convex shape from low to high amplitude and aggressive reflections; The facies in the hollow filling of the channels (c): are almost present over the entire Inline profile with slightly varying depths. The presence of these channels can be explained by the first marine incursions into open space by the first drift phase following the initial rift phase and during which the first oceanic crust formed; The chaotic facies (a): are mainly present at the eastern extension of the basin and can result from more or less coarse and heterogeneous inputs deposited in the sea level bed and at the end of the ascent. Moreover, when these are in depth, they can reflect poor data quality.

In crossline profile, we observe two facies represented by the letters (e) and (f) (Fig. 5):

The discontinuous (e) facies and the parallel (f) facies, which present reflectors with high amplitude and good lateral continuity and high frequency. These facies reflect a sedimentary environment of moderate energy.

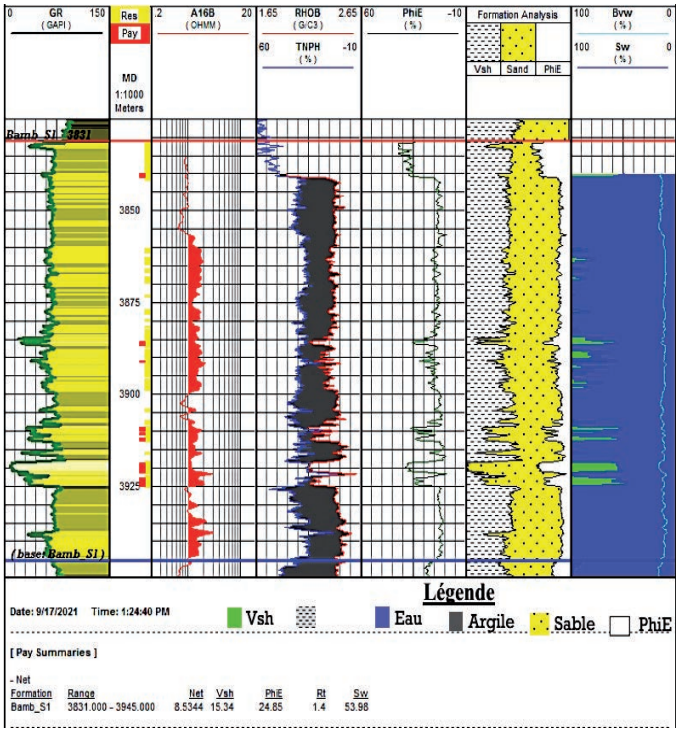


Figure 10. The litho-saturation plots of reservoir 1 of well P1 showing the negative separation between neutron and density logs and could indicate the presence of gas

Рисунок 10. Графики литонасыщенности пласта 1 скважины P1, показывающие отрицательное разделение между нейтронным каротажем и каротажем плотности, могут указывать на присутствие газа

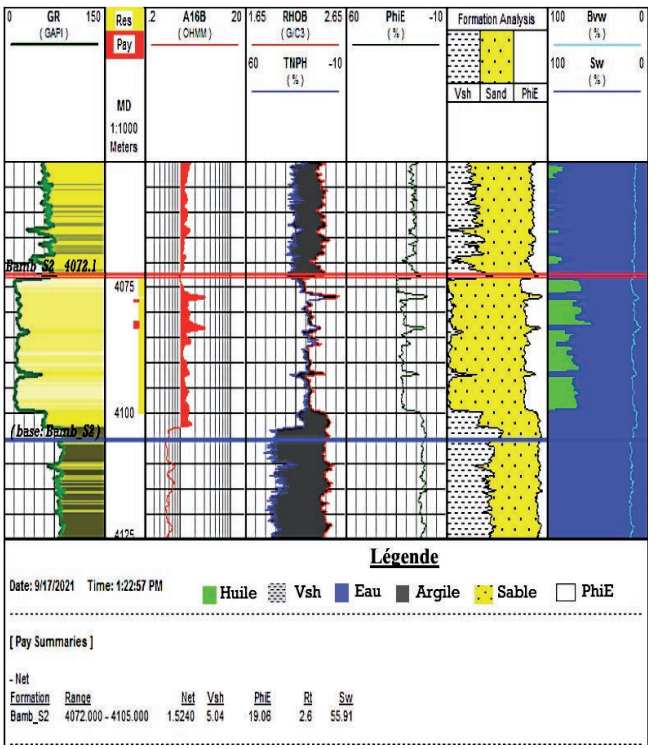


Figure 11. The litho-saturation plots of reservoir 2 of well P1 showing more crossed behaviour between neutron-density logs which could indicate the presence of oil

Рисунок 11. Графики литонасыщенности пласта 2 скважины P1, демонстрирующие более перекрестное поведение между данными нейтронно-плотностного каротажа, что может указывать на наличие нефти

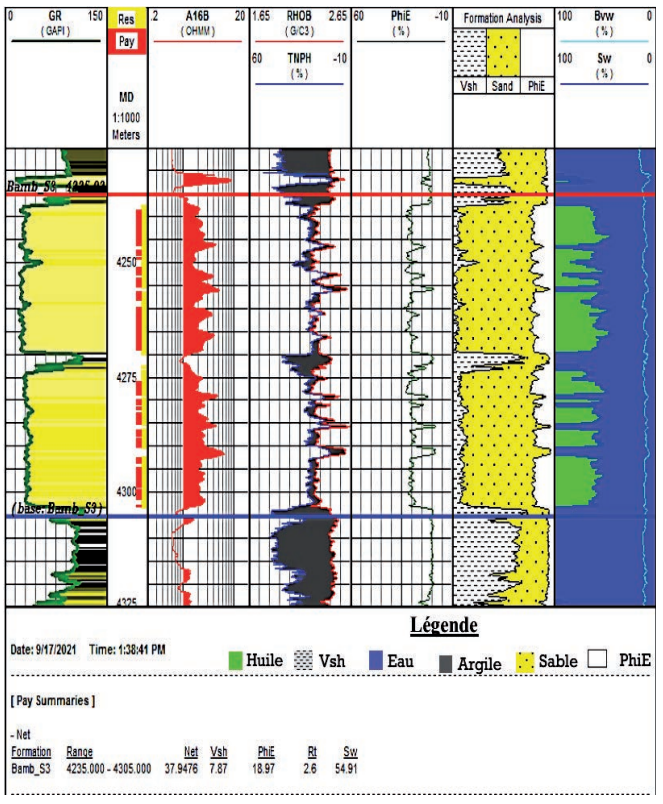


Figure 12. The litho-saturation plots of reservoir 3 of well P1

Рисунок 12. Графики литонасыщения пласта 3 скважины P1

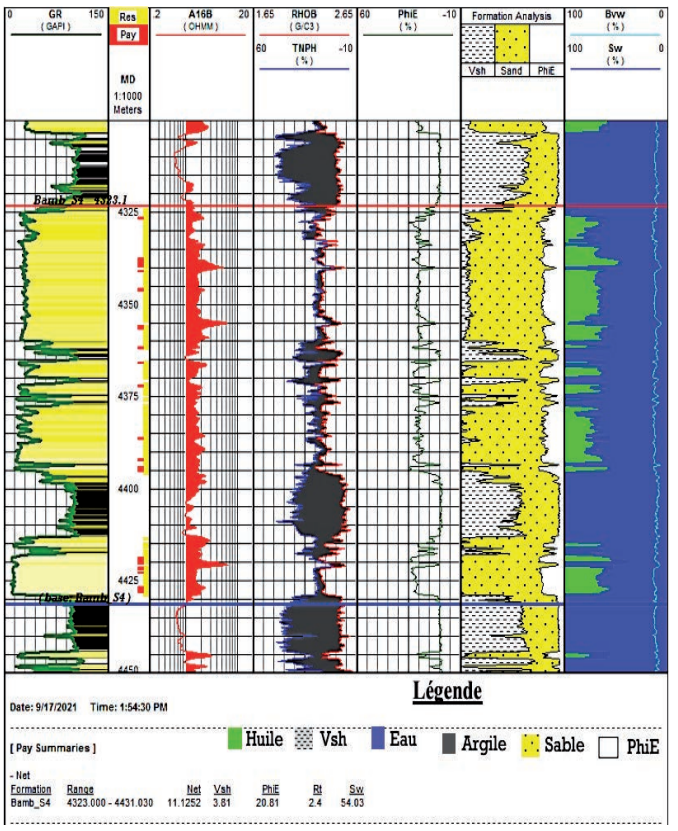


Figure 13. The litho-saturation plots of reservoir 4 of well P1

Рисунок 13. Графики литонасыщения пласта 4 скважины P1

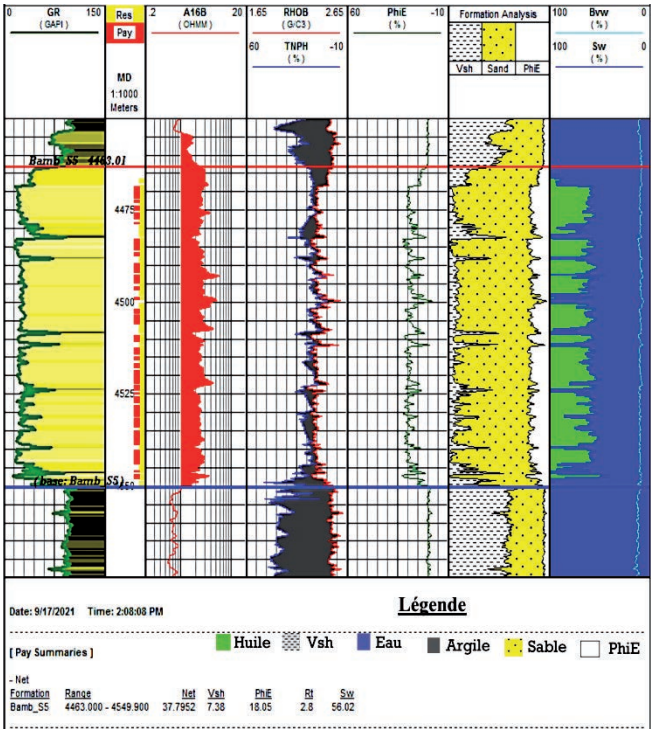


Figure 14. The litho-saturation plots of reservoir 5 of well P1
Рисунок 14. Графики литонасыщения пласта 5 скважины P1

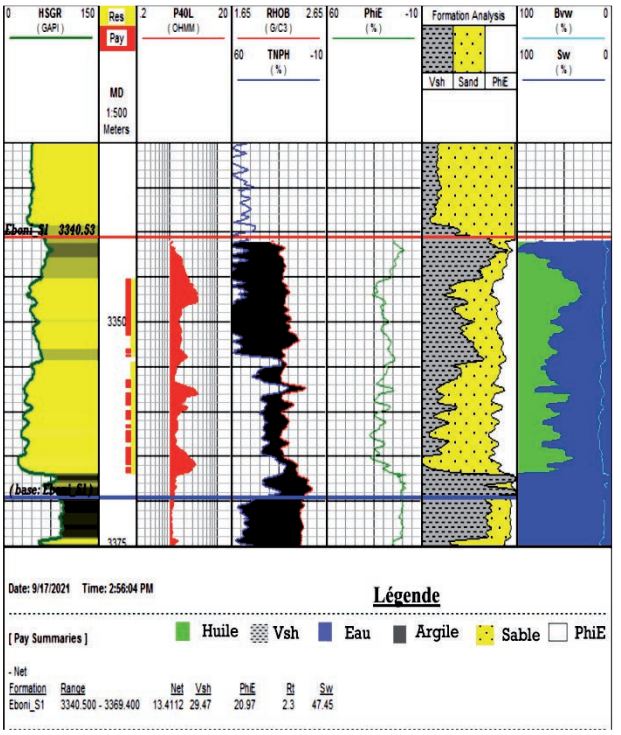


Figure 15. The litho-saturation plots of reservoir 1 of well 2
Рисунок 15. Графики литонасыщенности пласта 1 скважины 2

3. Structural model interpretation

Fig. 6 presents the results of the seismic interpretation (tracking or picking) of the horizons H1 and H2, and the faults with a step of 20 along the seismic volume to retrace the succession and the continuity of the sedimentary deposits in this basin.

Horizon H1: the oldest, it is represented on the profile by a yellow coloring (Fig. 6). This horizon is dated to the Lower Cretaceous, more precisely to the Aptian. It has a high amplitude to medium amplitude reflector along the W-E direction. A steep slope is also following the West direction.

Horizon H2: the most recent and is represented on the profile by a blue coloring (Fig. 6). This horizon is dated to the Upper Cretaceous, more precisely to the Campanian. It has a high amplitude reflector.

In terms of faults, the DKC basin does not have enough faults, however we have spotted three on the H1 horizon. These faults have almost a uniform NE-SW direction and are normal in nature.

4. Amplitude map interpretation

The amplitude maps of the two horizons above show zones with strong contrasts of amplitudes (circled zones) targeted by the two existing boreholes. These zones are marked by red and yellow colors with black outline (Figs. 7–9).

Upon analysis of said maps and the regional geological context in this area of the DKC basin, more precisely in the southern part, the sediments mainly come from the continental shelf westward and were deposited in the seabed by a phenomenon of progradation. Towards the southern end of the basin, we note the presence of a channel visible on both horizons, justified by the first marine incursions into the open space by the first phase of drift following the initial rift phase and during which the first oceanic crust is formed.

This channel therefore favoured the deposition and piling of sediments in this area. Two main directions of sediment deposition, to the east of the basin, the deposits of pure sands deposited along the channels also visible on the H1 and H2 horizons. In view of these results, it clearly appears that the Aptian (H1 horizon) and Campanian (H2 horizon) formations constitute areas of interest in view of their prospectively.

5. Petrophysical interpretation

The high-amplitude areas of interest identified after mapping the H1 and H2 horizons shown in figs. 7, 9, constitute potential sand accumulation (therefore reservoirs). In view of an active petroleum system in the DKC basin, these potential reservoirs could be loaded with hydrocarbons.

Five (05) zone have been identified, after evaluation of the physical parameters. The following results are obtained: according to well logs of location P1 given in figs. 10–14, the porosity (neutron-desity) logs of the retained reservoir shows less cross-behaviour in reservoir 1 (Fig. 10), which could associated to gas, and perfect cross-behaviour (Figs. 11–14) in reservoirs 2 to 5, which is a typical indicator of the presence of the oil in these reservoirs.

A considerable increase in resistivity logs can show that the fluids of the formations crossed are permeable and porous. In addition, the effective porosity logs (PhiE) obtained confirm the two hypotheses.

Table 1 shows the synthesis of the petrophysical parameters obtained after evaluation in the reservoir 1. The depth is the True Vertical Depth (TVD).

In Well P2, three (03) reservoirs (Figs. 15–17) were identified, after evaluation of the petrophysical parameters, the following results are obtained:

The logs from the P2 well show less crossed behaviour (negative separation between neutron and density curves)

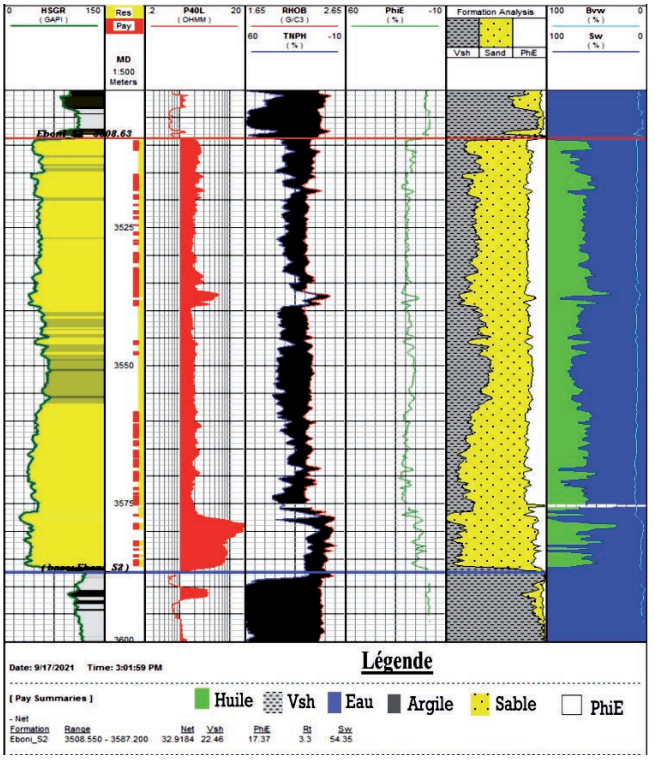


Figure 16. The litho-saturation plots of reservoir 2 of well 2
Рисунок 16. Графики литонасыщения пласта 2 скважины 2

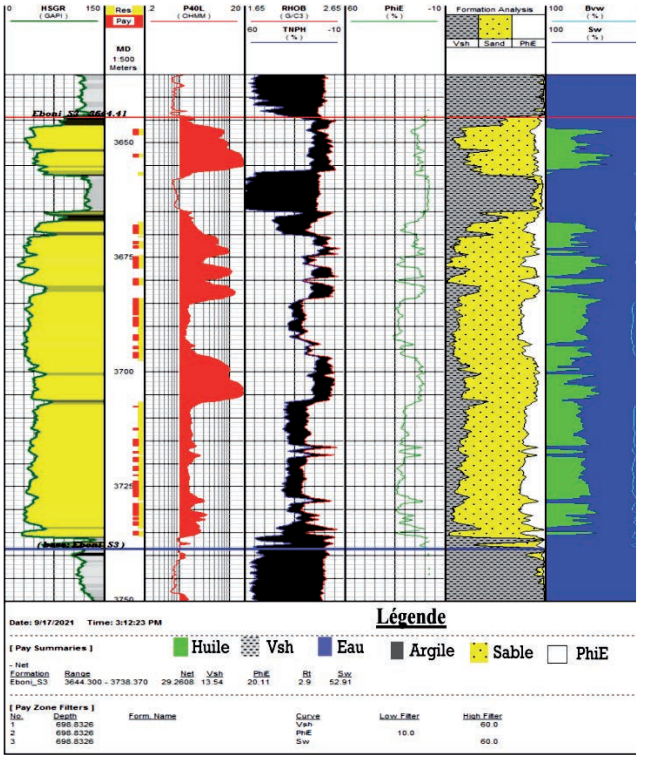


Figure 17. The litho-saturation plots of reservoir 3 of well 2
Рисунок 17. Графики литонасыщения пласта 3 скважины 2

Table 2. Petrophysical parameters of reservoir in well P1
Таблица 2. Петрофизические параметры пласта скважины P1

Reservoirs	Depth, m, TVD	Thickness, m	V_{sh}, %	PhiE, %	S_w, %	lithology	Natural fluids
R1	3340–3369	29.35	29.47	20.97	47.45	Sandy shale	Gas
R2	3508–3587	78.65	22.46	17.37	54.35	Sandy shale	Gas
R3	3644–3738	94.07	15.54	20.11	52.91	Sandy shale	Gas

density-neutron logs of the reservoirs selected (Figs. 15–17), this could indicate the presence of gas in these reservoirs. A variation in resistivity logs can show that the fluids of the formations crossed are more or less permeable and porous (sand-clay). In addition, the effective porosity logs (PhiE) obtained confirm the two hypotheses. Table 2 below shows the synthesis of the petrophysical parameters obtained after evaluation of reservoir 2.

The assessment of the hydrocarbon potential of the Cretaceous formations in the south of the Douala/Kribi-Campo basin was carried out using 3D seismic and well data analyses. Several hypotheses have been put forward to show the productivity of the basin. The seismic interpretation shows that the formations of the Lower Cretaceous (Aptian) and those of the Upper Cretaceous (Campanian) present a petroleum interest or potential reservoirs. Furthermore, the petrophysical evaluation of the two existing wells in the study area does not show a large enough number of potential reservoirs.

Considering the results obtained, it appears that, the sediments come mainly from the continental shelf coming from the East and were deposited on the seabed by a phenomenon of gradation forming channels. Previous wells made based on 2D seismic could not reach the targeted prospects. Analysis of two wells shows the presence of sand and shale banks at depths of over 3000 m. Furthermore, the Net/Pay ratio gives the exact proportion of hydrocarbons in these reservoirs. Thus, the Cretaceous formations, more specifically the Logbaba (Campanian) and Mundeck (Albian-Aptian) formations can be considered as areas of interest from the oil/gas point of view.

Conclusions

This research presents an integrated study of well log analysis and 3D seismic analysis for hydrocarbon reservoir an the nature of fluids content investigation in the southern part of DKC oil field. The geophysical investigation shows that the southern part of the DKC basin exhibit a hydrocabure potential manifestation. The 3D seismic gives potential areas of petroleum accumulation on the amplitude maps. The nature of fluids consists of gas, gas/oil and water. Five reservoirs have been identified in well P1 and three in well P2. The reservoirs lithology encounter are mostly the sand and sandy clay. The presence of petroleum interest is observed to the South and East of the Aptian-Campanian Formations; moreover, the logging data confirms the hypothesis that the sandy reservoirs targeted by the two wells do not have a high hydrocarbon potential. This work can serve for the future petroleum field reservoir in the DKC basin and will avoid the wrong position of future wells.

REFERENCES

1. Pletsch T., Erbacher J., Holbourn A. E., Kuhnt W., Moullade M., Oboh-Ikuenobede F. E., Söding E., Wagner T. 2001, Cretaceous separation of Africa and South America: the view from the West African margin (ODP leg 159). *Journal of South American Earth Sciences*, vol. 14, issue 2, pp. 147–174. https://doi.org/10.1016/s0895-9811(01)00020-7
2. Tohver E., D'Agrella-Filho M. S., Trindade R. I. F. 2006, Paleomagnetic record of Africa and South America for the 1200–500 Ma interval, and evaluation of Rodinia and Gondwana assemblies. *Precambrian Research*, vol. 147, issue 3–4, pp. 193–222. https://doi.org/10.1016/j.precamres.2006.01.015
3. Brownfield M. E., Charpentier R. R. 2006, Geology and Total Petroleum Systems of the West-Central Coastal Province (7203), West Africa. Reston, Virginia: U. S. Geological Survey Bulletin 2207-B, 52 p.
4. SNH. 2005, Synthèse sur le Bassin du Rio Del Rey et sur le bassin de Douala/Kribi-Campo. Rapport interne 14. SNH, 2019. Bilan de prospective du bassin de Douala Kribi Campo, 14 p.
5. Vail P. R., Todd R. G., Sangree J. B. 1977, Seismic stratigraphy and global changes of sea level, Part 5: chronostratigraphic significance of seismic reflections. Seismic Stratigraphy – Applications to Hydrocarbon Exploration. C. E. Payton (ed.). Tulsa, Oklahoma: American Association of Petroleum Geologists, vol. 26, pp. 99–116. https://doi.org/10.1306/M26490C7
6. Sloss L. L. 1963, Sequences in the cratonic interior of North America. *Geological Society of America Bulletin*, vol. 74, no. 2, pp. 93–114. https://doi.org/10.1130/0016-7606(1963)74[93:SITCIO]2.0.CO;2
7. Obimma K. J., Obiora D. N., Oha A. I., Ibuot J. C., Yakubu J. A., 2021. Seismic and petrophysical characterization of reservoirs in Kjoe field, on-Shore Niger Delta, Nigeria. *Petroleum and Coal*, vol. 63, issue 1, pp. 50–62.
8. Posamentier H. W., Allen G. P., James D. P., Tesson M. 1992, Forced regressions in a sequence stratigraphic framework: concepts, examples, and exploration significance. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, vol. 76, pp. 1687–1709.
9. Asquith G. B., Gibson C. R. 1982, Basic Well Log Analysis for Geologists. Tulsa, Oklahoma: American Association of Petroleum Geologists, 216 p.
10. Plint A. G., Nummedal D. 2000, The falling stage systems tract: recognition and importance in sequence stratigraphic analysis. Sedimentary Responses to Forced Regressions. D. Hunt, and R. L. Gawthorpe (eds). London: Geological Society, London, Special Publications, vol. 172, pp. 1–17. https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2000.172.01.01
11. Payton C. E. 1977, Seismic Stratigraphy – applications to Hydrocarbon Exploration. Tulsa, Oklahoma: American Association of Petroleum Geologists, vol. 26. 516 p.
12. Radwan A. A., Abdelwahhab M. A., Nabawy B. S., Mahfouz K. H., Ahmed M. S. 2022, Facies analysis-constrained geophysical 3D-static reservoir modeling of Cenomanian units in the Aghar Oilfield (Western Desert, Egypt): insights into paleoenvironment and petroleum geology of fluviomarine systems. *Marine and Petroleum Geology*, vol. 136, pp. 105–436. https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2021.105436
13. Mitchum R. M., Vail P. R., Thompson S. 1977, Seismic stratigraphy and global changes of sea level, Part 2: the depositional sequence as the basic unit for stratigraphic analysis. Seismic Stratigraphy – Applications to Hydrocarbon Exploration. C. E. Payton (ed.). Tulsa, Oklahoma: American Association of Petroleum Geologists, memoir 26, pp. 53–62. https://doi.org/10.1306/M26490C4
14. Schlumberger. 1998, Log Interpretation Charts. Sugar Land, Texas: Schlumberger Wireline and Testing, 176 p.
15. Doust H., Omatsola E. 1990, Niger Delta. Divergent/Passive Margin Basins. J. D. Edwards, P. A. Santogrossi (Eds). Tulsa, Oklahoma: American Association of Petroleum Geologists, vol. 48, pp. 201–238. https://doi.org/10.1306/M48508C4
16. Miall A. D. 1992, Exxon global cycle chart: an event for every occasion? *Geology*, vol. 20, no. 9, pp. 787–790. https://doi.org/10.1130/0091-7613(1992)020<0787:EGCCAE>2.3.CO;2
17. Edwards J. D., Santogrossi P. A. 1990, Summary and conclusions. Divergent/Passive Margin Basins. J. D. Edwards, P. A. Santogrossi (Eds). Tulsa, Oklahoma: American Association of Petroleum Geologists, vol. 48, pp. 239–248. https://doi.org/10.1306/M48508C5
18. Abdelmaksoud A., Radwan A. A. 2022, Integrating 3D seismic interpretation, well log analysis and static modelling for characterizing the Late Miocene reservoir, Ngatoro area, New Zealand. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, vol. 8, issue 2, pp. 1–31. http://dx.doi.org/10.1007/s40948-022-00364-8
19. Abdelwahhab M. A., Radwan A. A., Mahmoud H., Mansour A. 2022, Geophysical 3D-static reservoir and basin modeling of a Jurassic estuarine system (JG-Oilfield, Abu Gharadig basin, Egypt). *Journal of Asian Earth Sciences*, vol. 225, article number 105067. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2021.105067
20. Mellere D. 1994, Sequential development of an estuarine valley fill: the Twowells Tongue of the Dakota Sandstone, Acoma Basin, New Mexico. *Journal of Sedimentary Research*, vol. B64(4), pp. 500–515.
21. Reyre D. 1964, Histoire géologique du bassin de Douala Elf Serepca D.E/S.GL.C. Note interne.
22. Regnoult J. M. 1986, Synthèse Géologique du Cameroun. Yaoundé: Ministère des Mines et de l'nergie, 119 p.
23. Nguene F. R., Tamfu S., Loule J. P., Ngassa C. 1992, Paleoenvironments of the Douala and Kribi-Campo sub-basins in Cameroon, West Africa. Géologie Africaine. Bulletin du Centre de Recherche Exploration-Production Elf-Aquitaine. R. Curnelle (ed.), Memoire 13, pp. 129–139.
24. Tamfu S. F., Batupe M., Pauken R. J., Boatwright D. C. 1995, Geological setting, stratigraphy and hydrocarbon habitat of the Douala Basin, Cameroon. *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, vol. 79, no. 13, pp. 1–95.
25. Ntamak-Nida M. J., Bourquin S., Makong J.-C., Baudin F., Mpesse J. E., Ngouem C. I., Komguem P. B., Abolo G. M. 2010, Sedimentology and sequence stratigraphy from outcrops of the Kribi-Campo Sub-basin: lower Mundeck formation (lower cretaceous, southern Cameroon). *Journal of African Earth Sciences*, vol. 58, issue 1, pp. 1–18. https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2010.01.004
26. Giresse P. 1990, Esquisse géologique de l'Afrique centrale occidentale. Paysages quaternaires de l'Afrique centrale occidentale. Paris: ORSTOM. URL: http://horizon.documentation.ird.fr, pp. 15–19.
27. Lawrence S. R., Munday S., Bray R. 2002, Regional Geology and Geophysics of the Eastern Gulf of Guinea (Niger Delta to Rio Muni). *The Leading Edge*, vol. 21, issue 21, pp. 1112–1117. https://doi.org/10.1190/1.1523752
28. Galloway W. E. 1989, Genetic stratigraphic sequences in basin analysis I: architecture and genesis of flooding-surface bounded depositional units. *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, vol. 73, issue 2, pp. 125–142. https://doi.org/10.1306/703C9AF5-1707-11D7-8645000102C1865D
29. Dumort J. D. 1968, Notice Explicative sur la feuille Douala-Ouest. Carte Geologique de reconnaissance (1/500 000). Yaoundé, Cameroon: Direction des Mines et de la Geologie du Cameroun, 69 p.
30. Meyers J. B., Rosendahl B. R., Groschel-Becker H., Austin Jr. J. A., Rona P. A. 1996, Deep penetrating MCS imaging of the rift-to drift transition, offshore Douala and North Gabon basins, West Africa. *Marine and Petroleum Geology*, vol.13, issue 7, pp. 791–835. https://doi.org/10.1016/0264-8172(96)00030-X
31. ECL. 2001, An integrated study of structural development, source rock maturity and hydrocarbon generation in the Douala/Kribi-Campo basin, Republic of Cameroon. Rapport interne SNH. 185 p.
32. Logar J. F. 1983, WEC Afrique de l'ouest: Well Evaluation conference, published by Schlumberger, sl., pp. 1–69.
33. Robertson C. G. G. 2015, Petroleum Geological Evaluation: Niger Delta to the Congo Fan. CGG Robertson Multiclient. Report No. AM086.
34. Campbell C. V. 1967, Lamina, Laminaset, Bed, and Bedset. *Sedimentology*, vol. 8, issue 1, pp. 7–26. https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1967.tb01301.x

35. Belmonte Y. C. 1966, Stratigraphie du bassin sedimentaire du Cameroun. Proceedings of 2nd West African Micropaleontology Colloquium. Ibadan, pp. 65–77.
36. Salard-Chebodaeff M. 1977, Palynologie du bassin sédimentaire Littoral du Cameroun dans ses rapports avec la stratigraphie et la paléoécologie. Thèse de Doctorat d'Etat ès Sciences naturelles, 262 p.
37. Njike Ngaha P. R. 2004, Palynostratigraphie et Reconstitution des Paléoenvironnements du Crétacé de l'Est du bassin Sédimentaire de Douala (Cameroun). Thèse de Doctorat d'Etat. Yaoundé, Cameroon: Université de Yaoundé I, 258 p.
38. Abdel-Fattah M. I., Alrefaee H. A. 2014, Diacritical seismic signatures for complex geological structures: case studies from Shushan Basin (Egypt) and Arkoma Basin (USA). *International Journal of Geophysics*, vol. 2014, pp. 1–14. https://doi.org/10.1155/2014/876180
39. Howard R. E. 1991, Landmark Graphics Corporation. Method for attribute tracking in seismic data. Brevet American 5, pp. 56–66.
40. Serra O. 1979, Diagraphies Différés base de l'interprétation. Mémoire 1, Tome 1. Services techniques. Paris: Schlumberger, 631 p.
41. 1999, Mesozoic and Cenozoic Sequence Stratigraphy of European Basins. P. de Graciansky, J. Hardenbol, T. Jacquin, P. R. Vail (eds). Tulsa, Oklahoma: SEPM Special Publication, vol. 60, pp. 3–29. https://doi.org/10.2110/pec.98.02
42. Meunier M. 2011, Diagraphie di érée. IFP Training, 134 p.
43. Clavier C., Coates G., Dumanoir J. 1977, Theoretical and Experimental Bases for the Dual-Water Model for Interpretation of Shaly Sands. *Society of Petroleum Engineers Journal*, vol. 24, issue 2, pp. 153–168. https://doi.org/10.2118/6859-PA
44. Gay A., Lopez M., Cochonat P., Sermondadaz G. 2004, Polygonal faults-furrows system related to early stages of compaction-Upper Miocene to recent sediments of the Lower Congo Basin. *Basin Research*, vol. 16, issue 1, pp. 101–116. https://doi.org/10.1111/j.1365-2117.2003.00224.x

The article was received on November 25, 2023

УДК 550.839 http://doi.org/10.21440/2307-2091-2024-1-33-46

Гео-петрофизический анализ углеводородов в бассейне Дуала-Кампо, Камерун

Барежа ЙОМССИ ТИШУЕ[1*]
Валентина Михайловна УСОВА[2**]
Сикстус НТЕХ[1***]
Елена Михайловна КОТЕЛЬНИКОВА[2****]

[1]Университет Баменды, Баменда, Камерун
[2]Российский университет дружбы народов (РУДН), Москва, Россия

Аннотация

Актуальность работы. Анализ каротажа скважин и метод 3D-сейсморазведки объединяются для оценки характера флюидов и характеристик коллектора в бассейне Дуала-Кампо (ДК). Научные исследования, раскрывающие важные геологические и геофизические условия этого бассейна, отсутствуют.

Цель работы. Успешное исследование этих территорий возможно при условии правильной оценки стратиграфических и петрофизических свойств коллектора.

Методология исследования. Извлечение фациальных типов из сейсмических разрезов 3D является быстроразвивающейся дисциплиной, которая облегчает разработку моделей прогнозирования коллекторов. Поэтому была построена сейсмическая сетка размером 25 х 25 м, связанная с гамма-каротажем (GR), нейтронным каротажем (Nphi), каротажем удельного сопротивления, акустическим каротажем и каротажем плотности (RHOB).

Результаты и выводы. Результаты отражают осадочную среду и фацию, пористо-проницаемые глинистые отложения, глинистость, пористость, насыщенность и природу флюидов в коллекторе. Петрофизические оценки указывают на потенциальные залежи нефти, преимущественно песчано-глинистые с объемом 3,81–29,47 %, пористостью 17,37–27,85 % и водонасыщенностью 47,74–56,02 %. В пласте присутствуют нефть, газ и вода. Это исследование будет способствовать разведке углеводородов (УВ) в бассейне округа Колумбия за счет принятия стратегий, в которых сейсмическая стратиграфия в сочетании с данными скважин будет наиболее вероятным средством определения целей бурения для более независимых операторов. Результаты этого исследования послужат будущим старателям на соседних месторождениях нефти и газа в районе нашего исследования. Были достигнуты значительные успехи для обеспечения будущих успехов в разведке.

***Ключевые слова*:** 3D-сейсморазведка, пласт, каротаж, петрофизические параметры, ДК.

ЛИТЕРАТУРА

1. Pletsch T., Erbacher J., Holbourn A. E., Kuhnt W., Moullade M., Oboh-Ikuenobede F. E., Söding E., Wagner T. Cretaceous separation of Africa and South America: the view from the West African margin (ODP leg 159) // Journal of South American Earth Sciences. 2001. Vol. 14. Issue 2. P. 147–174. https://doi.org/10.1016/s0895-9811(01)00020-7
2. Tohver E., D'Agrella-Filho M. S., Trindade R. I. F. Paleomagnetic record of Africa and South America for the 1200–500 Ma interval, and evaluation of Rodinia and Gondwana assemblies // Precambrian Research. 2006. Vol. 147. Issue 3–4. P. 193–222. https://doi.org/10.1016/j.precamres.2006.01.015
3. Brownfield M. E., Charpentier R. R. Geology and Total Petroleum Systems of the West-Central Coastal Province (7203), West Africa. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey Bulletin 2207-B, 2006. 52 p.
4. SNH. Synthèse sur le Bassin du Rio Del Rey et sur le bassin de Douala/Kribi-Campo. Rapport interne 14. SNH, 2019. Bilan de prospective du bassin de Douala Kribi Campo, 2005. 14 p.
5. Vail P. R., Todd R. G., Sangree J. B. Seismic stratigraphy and global changes of sea level, Part 5: chronostratigraphic significance of seismic reflections. Seismic Stratigraphy – Applications to Hydrocarbon Exploration. C. E. Payton (ed.). Tulsa, Oklahoma: American Association of Petroleum Geologists, 1977, vol. 26, pp. 99–116. https://doi.org/10.1306/M26490C7
6. Sloss L. L. Sequences in the cratonic interior of North America // Geological Society of America Bulletin. 1963. Vol. 74. No. 2. P. 93–114. https://doi.org/10.1130/0016-7606(1963)74[93:SITCIO]2.0.CO;2
7. Obimma K. J., Obiora D. N., Oha A. I., Ibuot J. C., Yakubu J. A., Seismic and petrophysical characterization of reservoirs in Kjoe field, on-Shore Niger Delta, Nigeria // Petroleum and Coal. 2021. Vol. 63. Issue 1. P. 50–62.
8. Posamentier H. W., Allen G. P., James D. P., Tesson M. Forced regressions in a sequence stratigraphic framework: concepts, examples, and exploration significance // American Association of Petroleum Geologists Bulletin. 1992. Vol. 76. P. 1687–1709.

✉youmssi@mail.ru
** usova-vm@rudn.ru
https://orcid.org/0000-0002-0023-5913
***ntehsixtus@gmail.com
****kotelnikova-em@rudn.ru
https://orcid.org/0000-0001-8909-8953

9. Asquith G. B., Gibson C. R. Basic Well Log Analysis for Geologists. Tulsa, Oklahoma: American Association of Petroleum Geologists, 1982. 216 p.
10. Plint A. G. Nummedal D. The falling stage systems tract: recognition and importance in sequence stratigraphic analysis. Sedimentary Responses to Forced Regressions. Ed. by D. Hunt, R. L. Gawthorpe. London: Geological Society, London, Special Publications, 2000. Vol. 172. P. 1–17. https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2000.172.01.01
11. Payton C. E. Seismic Stratigraphy – applications to Hydrocarbon Exploration. Tulsa, Oklahoma: American Association of Petroleum Geologists, 1977. Vol. 26. 516 p.
12. Radwan A. A., Abdelwahhab M. A., Nabawy B. S., Mahfouz K. H., Ahmed M. S. Facies analysis-constrained geophysical 3D-static reservoir modeling of Cenomanian units in the Aghar Oilfield (Western Desert, Egypt): insights into paleoenvironment and petroleum geology of fluviomarine systems // Marine and Petroleum Geology. 2022. Vol. 136. P. 105–436. https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2021.105436
13. Mitchum R. M., Vail P. R., Thompson S. Seismic stratigraphy and global changes of sea level, Part 2: the depositional sequence as the basic unit for stratigraphic analysis. Seismic Stratigraphy – Applications to Hydrocarbon Exploration. Ed. by C. E. Payton. Tulsa, Oklahoma: American Association of Petroleum Geologists, 1977. Vol. 26. P. 53–62. https://doi.org/10.1306/M26490C4
14. Schlumberger. Log Interpretation Charts. Sugar Land, Texas: Schlumberger Wireline and Testing, 1998. 176 p.
15. Doust H., Omatsola E. Niger Delta. Divergent/Passive Margin Basins. Ed. by J. D. Edwards, P. A. Santogrossi. Tulsa, Oklahoma: American Association of Petroleum Geologists, 1990. Vol. 48. P. 201–238. https://doi.org/10.1306/M48508C4
16. Miall A. D. Exxon global cycle chart: an event for every occasion? // Geology. 1992. Vol. 20. No. 9. P. 787–790. https://doi.org/10.1130/0091-7613(1992)020<0787:EGCCAE>2.3.CO;2
17. Edwards J. D., Santogrossi P. A. Summary and conclusions. Divergent/Passive Margin Basins. Ed. by J. D. Edwards, P. A. Santogrossi. Tulsa, Oklahoma: American Association of Petroleum Geologists, 1990. Vol. 48. P. 239–248. https://doi.org/10.1306/M48508C5
18. Abdelmaksoud A., Radwan A. A. Integrating 3D seismic interpretation, well log analysis and static modelling for characterizing the Late Miocene reservoir, Ngatoro area, New Zealand // Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources. 2022. Vol. 8. Issue 2. P. 1–31. http://dx.doi.org/10.1007/s40948-022-00364-8
19. Abdelwahhab M. A., Radwan A. A., Mahmoud H., Mansour A. Geophysical 3D-static reservoir and basin modeling of a Jurassic estuarine system (JG-Oilfield, Abu Gharadig basin, Egypt) // Journal of Asian Earth Sciences. 2022. Vol. 225. Article number 105067. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2021.105067
20. Mellere D. Sequential development of an estuarine valley fill: the Twowells Tongue of the Dakota Sandstone, Acoma Basin, New Mexico // Journal of Sedimentary Research. 1994. Vol. B64(4). P. 500–515.
21. Reyre D. Histoire géologique du bassin de Douala Elf Serepca D.E/S.GL.C. Note interne, 1964.
22. Regnoult J. M. Synthèse Géologique du Cameroun. Yaoundé: Ministère des Mines et de l'nergie, 1986. 119 p.
23. Nguene F. R., Tamfu S., Loule J. P., Ngassa C. Paleoenvironments of the Douala and Kribi-Campo sub-basins in Cameroon, West Africa. Géologie Africaine. Bulletin du Centre de Recherche Exploration-Production Elf-Aquitaine. Ed. by R. Curnelle. 1992. Vol. 13. P. 129–139.
24. Tamfu S. F., Batupe M., Pauken R. J., Boatwright D. C. Geological setting, stratigraphy and hydrocarbon habitat of the Douala Basin, Cameroon // The American Association of Petroleum Geologists Bulletin. 1995. Vol. 79. No. 13. P. 1–95.
25. Ntamak-Nida M. J., Bourquin S., Makong J.-C., Baudin F., Mpesse J. E., Ngouem C. I., Komguem P. B., Abolo G. M. Sedimentology and sequence stratigraphy from outcrops of the Kribi-Campo Sub-basin: lower Mundeck formation (lower cretaceous, southern Cameroon) // Journal of African Earth Sciences. 2010. Vol. 58. Issue 1. P. 1–18. https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2010.01.004
26. Giresse P. Esquisse géologique de l'Afrique centrale occidentale. Paysages quaternaires de l'Afrique centrale occidentale. Paris: ORSTOM, 1990. URL: http://horizon.documentation.ird.fr, pp. 15–19.
27. Lawrence S. R., Munday S., Bray R. Regional Geology and Geophysics of the Eastern Gulf of Guinea (Niger Delta to Rio Muni) // The Leading Edge. 2002. Vol. 21. Issue 21. P. 1112–1117. https://doi.org/10.1190/1.1523752
28. Galloway W. E. Genetic stratigraphic sequences in basin analysis I: architecture and genesis of flooding-surface bounded depositional units // The American Association of Petroleum Geologists Bulletin. 1989. Vol. 73. Issue 2. P. 125–142. https://doi.org/10.1306/703C9AF5-1707-11D7-8645000102C1865D
29. Dumort J. D. Notice Explicative sur la feuille Douala-Ouest. Carte Geologique de reconnaissance (1/500 000). Yaoundé, Cameroon: Direction des Mines et de la Geologie du Cameroun, 1968. 69 p.
30. Meyers J. B., Rosendahl B. R., Groschel-Becker H., Austin Jr. J. A., Rona P. A. Deep penetrating MCS imaging of the rift-to drift transition, offshore Douala and North Gabon basins, West Africa // Marine and Petroleum Geology. 1996. Vol. 13. Issue 7. P. 791–835. https://doi.org/10.1016/0264-8172(96)00030-X
31. ECL. An integrated study of structural development, source rock maturity and hydrocarbon generation in the Douala/Kribi-Campo basin, Republic of Cameroon. Rapport interne SNH, 2001. 185 p.
32. Logar J. F. WEC Afrique de l'ouest: Well Evaluation conference, published by Schlumberger, sl., 1983. P. 1–69.
33. Robertson C. G. G. Petroleum Geological Evaluation: Niger Delta to the Congo Fan. CGG Robertson Multiclient. Report No. AM086, 2015.
34. Campbell C. V. Lamina, Laminaset, Bed, and Bedset // Sedimentology. 1967. Vol. 8. Issue 1. P. 7–26. https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1967.tb01301.x
35. Belmonte Y. C. Stratigraphie du bassin sedimentaire du Cameroun. Proceedings of 2nd West African Micropaleontology Colloquium. Ibadan, 1966. P. 65–77.
36. Salard-Chebodaeff M. Palynologie du bassin sédimentaire Littoral du Cameroun dans ses rapports avec la stratigraphie et la paléoécologie. Thèse de Doctorat d'Etat ès Sciences naturelles, 1977. 262 p.
37. Njike Ngaha P. R. Palynostratigraphie et Reconstitution des Paléoenvironnements du Crétacé de l'Est du bassin Sédimentaire de Douala (Cameroun). Thèse de Doctorat d'Etat. Yaoundé, Cameroon: Université de Yaoundé I, 2004, 258 p.
38. Abdel-Fattah M. I., Alrefaee H. A. Diacritical seismic signatures for complex geological structures: case studies from Shushan Basin (Egypt) and Arkoma Basin (USA) // International Journal of Geophysics. 2014. Vol. 2014. P. 1–14. https://doi.org/10.1155/2014/876180
39. Howard R. E. Landmark Graphics Corporation. Method for attribute tracking in seismic data. Brevet American 5, 1991. P. 56–66.
40. Serra O. Diagraphies Différés base de l'interprétation. Mémoire 1, Tome 1. Services techniques. Paris: Schlumberger, 1979. 631 p.
41. Mesozoic and Cenozoic Sequence Stratigraphy of European Basins. Ed. by P. de Graciansky, J. Hardenbol, T. Jacquin, P. R. Vail. Tulsa, Oklahoma: SEPM Special Publication, 1999. Vol. 60, pp 3–29. https://doi.org/10.2110/pec.98.02
42. Meunier M. Diagraphie di érée. IFP Training, 2011. 134 p.
43. Clavier C., Coates G., Dumanoir J. Theoretical and Experimental Bases for the Dual-Water Model for Interpretation of Shaly Sands // Society of Petroleum Engineers Journal. 1977. Vol. 24. Issue 2. P. 153–168. https://doi.org/10.2118/6859-PA
44. Gay A., Lopez M., Cochonat P., Sermondadaz G. Polygonal faults-furrows system related to early stages of compaction-Upper Miocene to recent sediments of the Lower Congo Basin // Basin Research. 2004. Vol. 16. Issue 1. P. 101–116. https://doi.org/10.1111/j.1365-2117.2003.00224.x

Статья поступила в редакцию 25 ноября 2023 года

UDC 550.83 http://doi.org/10.21440/2307-2091-2024-1-47-52

The prospects of hydrocarbon deposits in avalanche sedimentary bodies in the South Caspian Basin (SCB)

Reyhankhanim Yashar GANIEVA*

Azerbaijan State Oil and Industry University, Baku, Azerbaijan

Abstract

Introduction. Avalanche sedimentation leads to the formation of sediments saturated with water and organic matter, characterized by incomplete geochemical processes. The combination of necessary conditions, such as the presence of high organic content in such deposits, the mass of rapidly accumulating and enormously thick sediments, as well as the presence of reservoir and mantle, contributes to the formation of deposits of oil, gas, bitumen, shale, coal, phosphorite, sulfur, and other valuable minerals. The Pliocene period is characterised by a rapid sea-level drop, the subsidence of the South Caucasus crust, and the onset of deposits. At the Miocene-Pliocene boundary, intense folding and mountain-building were accompanied by the intense subsidence of the South Caspian Depression depression. Extensive areas of the Middle Caspian and modern intermountain depressions have been identified. Major rivers (Paleo-Volga, Paleo-Kura, Paleo-Uzboy) and dozens of smaller rivers carved deep valleys on the surrounding surface. They flowed into the Pliocene lake, providing a large amount of detrital material. Based on geological interpretations of various types of sedimentary basins, the overall shape, internal structure, and direction of sediment accumulation are linked to paleotectonic and paleogeographic conditions of sedimentation under the active influence of eustatic (or relative) sea level changes.

Subject matter. In the South Caspian Basin (SCB), particularly on the Turkmenistan shelf, there are well-defined Pleistocene clinoform bodies resulting from avalanche sedimentation. In recent decades, as a result of lithological studies of the marine and oceanic shelves through deep drilling in water basins and observations using underwater exploration means, relatively narrow elongated sections have been identified where the thickness of sedimentary complexes reaches 10–15 km. Such local accumulations of sedimentary mass or sedimentary cover have formed at the estuary of several major rivers as well as in the lower part of the continental slope along the ocean coastline.

Research objective is to considered the role of avalanche sedimentation asthe main reserves of oil and gas depositions, and in particular, every third ton of oil is extracted from the ocean floor.

Research results. The modern structure of the South Caspian Basin has been formed as a result of active tectonic movements and intensive sedimentation processes predominant at certain stages of its development. Based on the characteristics of spatial parameters, several classes of sedimentary bodies (SB) are distinguished here: vertical (aggradational) and lateral accretion (progradational) bodies, accumulative, massive, exogenous relief forms, and others.

Conclusions. It has been established that the seismostratigraphic analysis utilizing additional materials (study of paleorelief morphostructure, layer thickness, etc.) and deep well investigations aim to explain the origin of deposits in the lower layers of the Productive Thickness, considering modern perspectives. Large-scale lithological-stratigraphic (non-anticlinal) oil and gas accumulations provide a solid foundation for identifying favorable areas for trap formation.

***Keywords*:** deposits, avalanche sedimentary, clinoform bodies, sequence, pliocene, South Caspian Basin.

Introduction

In recent decades, as a result of lithological studies of the marine and oceanic shelves through deep drilling in water basins and observations using underwater exploration means, relatively narrow elongated sections have been identified where the thickness of sedimentary complexes reaches 10–15 km. Such local accumulations of sedimentary mass or sedimentary cover have formed at the estuary of several major rivers as well as in the lower part of the continental slope along the ocean coastline. According to the views of many researchers [1–4] the accumulation of sedimentary masses in these formations can occur in the form of very rapid (more than 100 mm/1000 years) and super-rapid (more than 1000 mm/1000 years) deposition, which is called avalanche sedimentation (similar to the accumulation of avalanches in mountains). The uniqueness of these formations lies in the fact that the increase in sedimentation rate is accompanied by a sharp transition of the amount of sediment into a new quality. Avalanche sedimentation leads to the formation of sediments saturated with water and organic matter, characterized by incomplete geochemical processes. The combination of necessary conditions, such as the presence of high organic content in such deposits, the mass of rapidly accumulating and enormously thick sediments, as well as the

✉civildefenseasoiu@gmail.com
https://orcid.org/0000-0003-2808-3760

presence of reservoir and mantle, contributes to the formation of deposits of oil, gas, bitumen, shale, coal, phosphorite, sulfur, and other valuable minerals.

Thus, according to expert assessments, at present, the main reserves of oil and gas are located in avalanche deposition zones, and in particular, every third ton of oil is extracted from the ocean floor. Overall, based on the extensive experience of oil and gas operations in the World Ocean, two characteristic features should be noted:

– Firstly, the number of oil fields on the ocean shelf is almost three times higher than the number of gas fields, indicating more favorable conditions for oil formation;

– Secondly, the overwhelming majority of deposits (about 83%) are associated with carbonate reservoirs (especially empty reef structures), with only 17% being related to terrigenous rocks.

In the South Caspian Basin (SCB), particularly on the Turkmenistan shelf, there are well-defined Pleistocene clinoform bodies resulting from avalanche sedimentation. These clinoforms are formed due to the vigorous activity of shelf deltas, as depicted in fig. 1.

The Pleistocene delta of Palaeo-Amu-Darya consists of a clinoform complex that stretches over 150 km in 5–10 layers towards the west. This clinoform was first identified by Mitchum in 1977 as "a sloping sedimentary surface associated with deep-water extension" [3]. The main types of these clinoforms are the oblique and sigmoidal clinoform bodies, which can be observed in the basin (SCB).

The sigmoidal progradational configuration consists of S-shaped sediments with horizontal uplifts and thicker intermediate ("abrupt") series. Sigmoidal clinoform bodies (sigmoidal offset) are characterised by crustal lowering and sea level rise above the sediments.

The strata that are more steeply sloping and connect to the strata boundaries indicate an inclined progradation configuration. Inclined clinoforms develop when there is a period of eustatic stagnation and/or increased sediment input or low retreat.

These conditions may have occurred during the deposition of Sequences 8 and 9, in response to the concentration of deltaic sediments in a particular area. The scarp edge advanced to its present position, assembling a thick clinoform complex. The sedimentary deposits in the basin are mainly draped facies (represented by vertical solid lines) and filled turbidites. The black and white dashed zones indicate the presence of landslides and avalanches.

The central part of the basin east of the Abikh-Vazirov trough has the same high-amplitude continuous parallel facies along the structures and the Amu Darya thrust. Turbidites are present in the troughs and are confined to the cover facies. Channel systems are much smaller in size than previous sequences and are concentrated near the coast. There are two main locations of channel systems: the Abikha sag, or submarine Amu Darya ejection cone, and the southeastern slope of the Palaeo-Amu Darya.

The reduction in sediment influx into the central basin and the concentration of sediment accumulation on the shelf coast may be associated with conditions of a high relative sea level during the deposition of the last sequence.

Each clinoform represents a lens-shaped or mound-like geological body extending along the field. Within one complex, the configuration of seismic facies significantly varies from profile to profile. This indicates the connection of a particular seismic facies with a distinct unified body showing localised development.

In fig. 2, along the cross-section, complex lens-shaped and sharp structures of objects, lateral accretion bodies, are highlighted.

River deltaic arrays, representing examples of deltaic sedimentation, are of utmost importance in the sedimentary cover, as they are rich in reservoir rocks. Late Cenozoic paleobasins were filled with deltaic deposits. In the territory studied by P. Z. Mamedov [5], buried deltaic arrays of Pliocene age of the paleo-Volga and Paleo-Uzboy have been extensively examined (based on GSW (geophysical studies of wells) data, seismic surveys, and core data).

The Pliocene period is characterised by a rapid sea-level drop, the subsidence of the South Caucasus crust, and the onset of deposits. At the Miocene-Pliocene boundary, intense folding and mountain-building were accompanied by the intense subsidence of the South Caspian Depression depression. Extensive areas of the Middle Caspian and modern intermountain depressions have been identified. Major rivers (Paleo-Volga, Paleo-Kura, Paleo-Uzboy) and dozens of smaller rivers carved deep valleys on the surrounding surface. They flowed into the Pliocene lake, providing a large amount of detrital material (Fig. 3) [6–10].

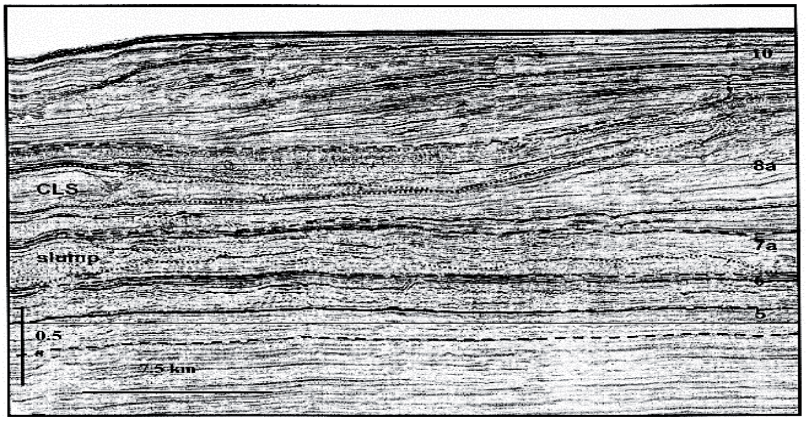


Figure 1. Seismic cross-section from the modern boundary of the Turkmen Shelf
Рисунок 1. Сейсмический разрез от современной границы Туркменского шельфа

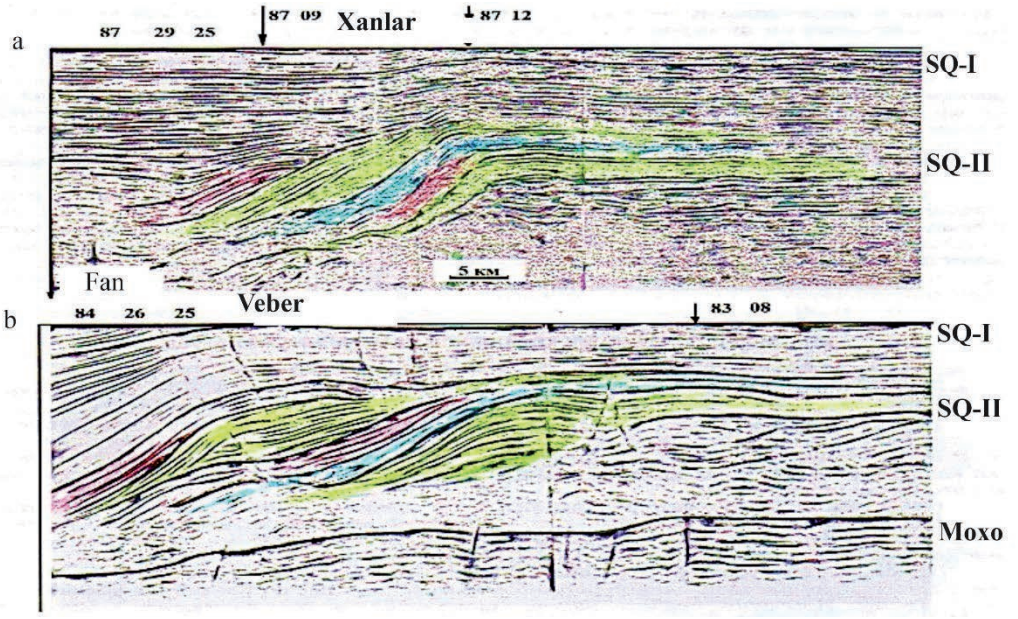


Figure 2. Time cross-sections illustrating lateral growth bodies in the Early Pliocene – *a, b* (SQ-sequence)
Рисунок 2. Временные разрезы, иллюстрирующие тела латерального роста в раннем плиоцене – *а, б* (SQ-последовательность)

The morpho-textural features of deltaic sandy-alluvial formations are well-studied in the natural exposures of the Apsheron Peninsula. Between the estuaries (Chilov Island in the Kirmakinsky block, the valley of the Sumgait River, among others), the upper part of the delta consists of shale layers intersected by sub-horizontal eroded and erosion surfaces (A. Sultanov, V. Gorin, 1963) [11].

Overall, as a result of seismic and seismostratigraphic studies conducted in the South Caspian Basin, it has been established that, unlike the northwest segment of the Paleo-Volga, a fan-shaped narrow topodepression is developed in the northeastern segment, near a steep slope (approximately 200 km) (Fig. 4).

In 1986, P. Z. Mamedov while studying laterally growing bodies on the Turkmen Shelf, proposed a theory about the existence of a residual deep-water topo-depression on the southern margin of the Pliocene basin (at the site of the modern Elbrus Basin-Depression) [5, 6].

Considering the non-oil-generating characteristics of the oil-source rocks in the PT (Productive Thickness), the oil and gas potential of reservoir layers, covers, and regional layers, studies have suggested that the search for hydrocarbons in coastal-marine and deltaic deposits in the South Caspian Basin holds significant promise [12–15]. Specifically, the examination of available materials indicates that among numerous facies with hydrocarbon concentration in the lower layers of the productive layer, sand-alluvial deposits of deltaic origin appear to be advantageous. For this reason, the uplifts in the northern anticlinal belt (Sevinj, Arzu, named after Shapiro, 40th Anniversary of Azerbaijan, among others) can be considered highly prospective for maximum hydrocarbon accumulation. These uplifts are located in the middle Pliocene, i.e., in territories near the channel and deltaic systems formed during the Kala and Prodkiyrmakin periods. It is likely that traps concentrated in the lagoon and alluvial channel facies of the Kirmakinsky Suite of the Northern Absheron could be rich in hydrocarbons.

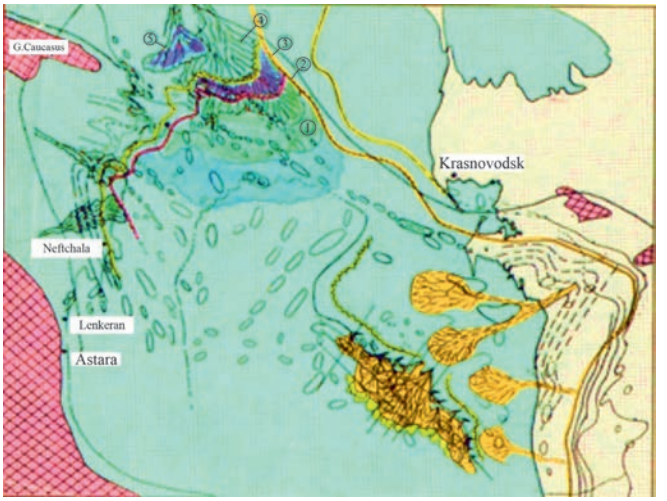


Figure 3. Sedimentation in deep-water basins at the convergent stage of development. Models of delta sedimentation (according to P. Z. Mamedov, 1991) [4]
Рисунок 3. Седиментация в глубоководных бассейнах на конвергентной стадии развития. Модели дельтовой седиментации (по П. З. Мамедову, 1991) [4]

Results

1. Based on the principles of seismic stratigraphic analysis and geophysical data, the conditions of sediment formation were studied and the areas of alluvial, lagoonal, deltaic and coastal-marine sediment formation in lateral direction were determined.

2. The modern structure of the South Caspian Basin has been formed as a result of active tectonic movements and intensive sedimentation processes predominant at certain stages of its development. Based on the characteristics of spatial parameters, several classes of sedimentary bodies (SB) are distinguished here: vertical (aggradational) and lateral accretion (progradational) bodies, accumulative, massive, exogenous relief forms, and others.

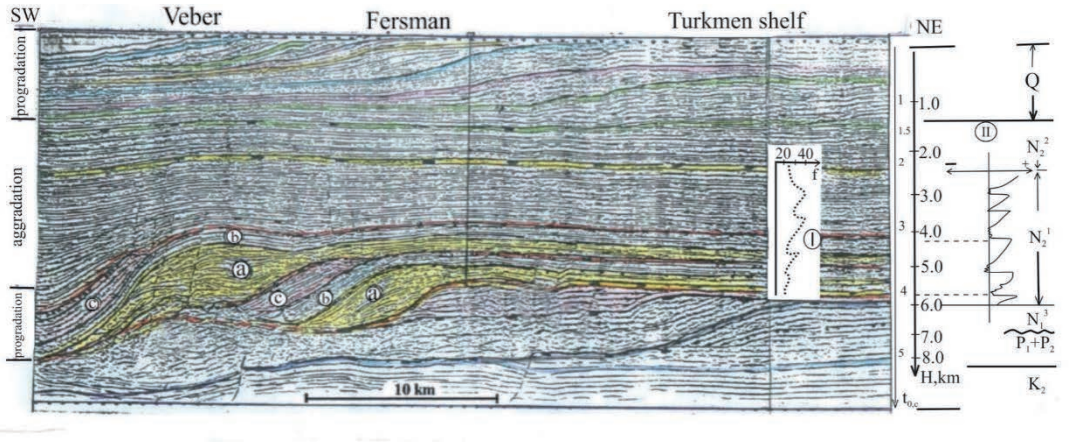


Figure 4. Chronostratıgraphic sectıon dısplayıng relative sea level fluctuations and hiatus in accumulation of Paleo-Uzboy avandeltaic sequence in the South Caspian basin

Рисунок 4. Хроностратиграфический разрез, показывающий относительные колебания уровня моря и перерыв в накоплении палеоузбойской авандельтовой толщи в Южно-Каспийском бассейне

3. The areas of formation of cross-layered and growing structures are observed in the border part of the Productive Thickness sedimentary basin and near its perimeter. Seismostratigraphic analysis utilizing additional materials (study of paleorelief morphostructure, layer thickness, etc.) and deep well investigations aim to explain the origin of deposits in the lower layers of the Productive Thickness, considering modern perspectives. Large-scale lithological-stratigraphic (non-anticlinal) oil and gas accumulations provide a solid foundation for identifying favorable areas for trap formation.

4. Based on geological interpretations of various types of sedimentary basins, the overall shape, internal structure, and direction of sediment accumulation are linked to paleotectonic and paleogeographic conditions of sedimentation under the active influence of eustatic (or relative) sea level changes.

5. These uplifts are located in the middle Pliocene, that is, in territories near channel and deltaic systems formed during the periods of Kala and Podkiyrmakin. Likely, traps concentrated in the lagoon and alluvial channel facies of the Kirmakinsky formation of the Northern Absheron could be rich in hydrocarbons.

REFERENCES

1. Lisitsyn A. P. 1980, General patterns of the structure of sedimentary strata of the ocean. Geological history of the ocean. Moscow, pp. 36–104.
2. Kerimov M. Z., Babaev M. B. 2003, Prospects for the effective exploitation and development of offshore oil and gas fields. *Doklady NAN Azerbaidzhana* [Proceedings of the Azerbaijan National Academy of Sciences], no. 3-4, pp. 163–168.
3. Aliev A. I., Aliev E. A. 2011, Oil and gas potential of great depths. Baku. 418 p.
4. Mamedov P. Z. 1991, Paleo-deltaic complexes in the north of the South Caspian Depression. *Petroleum Geology: A Digest of Russian Literature*, vol. 25, no. 9/10, pp. 344–346.
5. Mammadov P. Z. 2008, The Subsidence Evolution of the South Caspian Basin. Caspian and Black Sea Geosciences Conference, pp. 1–5. https://doi.org/10.3997/2214-4609.20146089
6. Mamedov P. Z. 2009, Models of sedimentation in South Caspian mega-basin and their seismic stratigraphy characteristics. *Journal of Stratigraphy and sedimentology of oil and gas basins*, no. 1, pp. 51–67.
7. Kerimova K. A., Seidov V. M. [et al.]. 2015, Correlation of lithofacies in the chronostratigraphic boundaries of the Productive Sequence on the regional seismic profile of the Absheron-Balakhani tectonic zone of the South Caspian Basin. *Azerbaidzhan neftyanoe khozyaistvo* [Azerbaijan Oil Industry], no. 3, pp. 10–14.
8. Vincent S. J., Davies C. E., Richards K., Aliyeva E. 2010, Contrasting Pliocene fluvial depositional systems within the rapidly subsiding South Caspian basin; a case study of the palaeo-Volga and palaeo-Kura river systems in the Surakhany Suite, Upper Productive Series, onshore Azerbaijan. *Marine and Petroleum Geology*, vol. 27, issue 10, pp. 2079–2106. https://dx.doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2010.09.007
9. Green T., Abdullayev N., Hossack J., Riley G., Roberts A. M. 2009, Sedimentation and subsidence in the South Caspian Basin, Azerbaijan. *Geologial Society, London, Special Publications*, vol. 312, pp. 241–260. https://doi.org/10.1144/SP312.12
10. Mamedov P. Z., Mamedova L. P. 2012, Earth crust structure of the Southern and Middle Caspian Sea in the light of new seismic studies. The Modern Problems of Geology and Geophysics of Eastern Caucasus and the South Caspian Depression: 34th International Geological Congress (Brisbane, Australia, August 5–10, 2012). Baku, pp. 251–258.
11. Sultanov A. D., Gorin V. A. 1963, Productive strata of the western side of the South Caspian depression: Sedimentation, mineralogical composition, textural and structural features, migration of oil and gas. Baku, 290 p.
12. Allen M. B., Jones S., Ismail-Zadeh A., Simmons M. D., Anderson L. 2002, Onset of subduction as the cause of rapid Pliocene-Quaternary subsidence in the South Caspian basin. *Geology*, vol. 30, issue 9, pp. 775–778. https://doi.org/10.1130/0091-7613(2002)030<0775:OOSATC>2.0.CO;2
13. Babaev Sh. A. 2009, On the stratigraphic position of the Productive Formation of Azerbaijan. *Izvestiya NAN Azerbaidzhana* [News of the Azerbaijan National Academy of Sciences. Earth Sciences], no. 2, pp. 26–30.
14. Abasov M. T., Aliyarov R. Yu., Guliev I. S.2007, Geological and technological basis for increasing hydrocarbon reserves in Azerbaijan. *Azerbaidzhan neftyanoe khozyaistvo* [Azerbaijan Oil Industry], no. 2, p. 20–29.
15. Dilbazi Z. Kh., Aslanov T. I., Gadzhiev F. M., Shikhlinsky Z. A., Sultanov P. T. 1993, Oil and gas potential of the upper part of the Productive Formation and Upper Pliocene-anthropogenic deposits of the South-Eastern Absheron. *Azerbaidzhan neftyanoe khozyaistvo* [Azerbaijan Oil Industry], no. 7–8, pp. 11–15.

The article was received on December 13, 2023

УДК 550.83 http://doi.org/10.21440/2307-2091-2024-1-47-52

Перспективы развития углеводородных месторождений в лавинно-осадочных телах Южно-Каспийского бассейна (ЮКБ)

Рейханханим Яшаровна ГАНИЕВА*

Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности, Баку, Азербайджан

Аннотация

Введение. Лавинная седиментация приводит к образованию насыщенных водой и органическим веществом отложений, характеризующихся незавершенными геохимическими процессами. Совокупность необходимых условий, таких как наличие в отложениях высокого содержания органических веществ, масса быстро накапливающихся огромной толщины осадков, а также наличие коллектора и мантии способствуют образованию месторождений нефти, газа, битума, сланцев, угля, фосфоритов, серы и других ценных полезных ископаемых. Плиоценовый период характеризовался быстрым падением уровня моря, проседанием земной коры Южного Кавказа и появлением отложений. На рубеже миоцена и плиоцена интенсивная складчатость и горное строительство сопровождались интенсивным опусканием Южно-Каспийской впадины. Выявлены обширные территории Среднекаспийской и современных межгорных впадин. Крупные реки (Палео-Волга, Палео-Кура, Палео-Узбой) и десятки более мелких рек прорезали глубокие долины на окружающей поверхности. Они впадали в плиоценовое озеро, поставляя большое количество детритового материала. Согласно геологической интерпретации различных типов осадочных бассейнов, общая форма, внутренняя структура и направление осадконакопления связаны с палеотектоническими и палеогеографическими условиями осадконакопления под активным влиянием эвстатических (или относительных) изменений уровня моря.

Предмет исследования. В Южно-Каспийском бассейне (ЮКБ), особенно на шельфе Туркменистана, хорошо выражены плейстоценовые клиноформные тела, образовавшиеся в результате лавинного осадконакопления. В последние десятилетия в результате литологических исследований морского и океанического шельфа путем глубокого бурения в водных бассейнах и наблюдений с помощью средств подводной разведки были выявлены относительно узкие вытянутые участки, где толщина осадочных комплексов достигает 10–15 км. Такие локальные скопления осадочной массы или осадочного чехла сформировались в устьевых участках ряда крупных рек, а также в нижней части континентального склона вдоль океанского побережья.

Цель исследования – рассмотреть роль лавинной седиментации как основного резерва нефтегазовых месторождений, в частности, каждой третьей тонны нефти, добываемой со дна океана.

Результаты исследований. Современная структура Южно-Каспийской впадины сформировалась в результате активных тектонических движений и интенсивных процессов осадконакопления, преобладающих на определенных этапах ее развития. На основе характеристики пространственных параметров здесь выделяются несколько классов осадочных тел (ОТ): тела вертикальной аккреции (аградации) и латеральной аккреции (проградации), аккумулятивные, массивные, экзогенные формы рельефа и другие.

Выводы. Установлено, что сейсмостратиграфический анализ с использованием дополнительных материалов (изучение морфоструктуры палеорельефа, толщины слоев и т. д.) и исследования глубоких скважин позволяют объяснить происхождение отложений в нижних слоях продуктивной толщи с учетом современных перспектив. Крупномасштабные литолого-стратиграфические (неантиклинальные) скопления нефти и газа служат надежной основой для выявления благоприятных зон для формирования ловушек.

***Ключевые слова*:** отложения, лавинные отложения, клиноформные тела, последовательность, плиоцен, Южно-Каспийская впадина.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лисицын А. П. Общие закономерности строения осадочных толщ океана // Геологическая история океана. М.: Наука, 1980. С. 36–104.
2. Керимов М. З., Бабаев М. Б. Перспективы эффективной эксплуатации и освоения морских месторождений нефти и газа // Докл. НАНА. 2003. № 3-4. С. 163–168.
3. Алиев А. И., Алиев Э. А. Нефтегазоносность больших глубин. Баку: Оскар, 2011. 418 с.
4. Mamedov P. Z. Paleo-deltaic complexes in the north of the South Caspian Depression // Petroleum Geology: A Digest of Russian Literature. 1991. Vol. 25. No. 9/10. P. 344–346.
5. Mammadov P. Z. The Subsidence Evolution of the South Caspian Basin // Caspian and Black Sea Geosciences Conference. 2008. P. 1–5. https://doi.org/10.3997/2214-4609.20146089
6. Mamedov P. Z. Models of sedimentation in South Caspian mega-basin and their seismic stratigraphy characteristics // Journal of Stratigraphy and sedimentology of oil and gas basins. 2009. No. 1. P. 51–67.

✉civildefenseasoiu@gmail.com
https://orcid.org/0000-0003-2808-3760

7. Керимова К. А., Сеидов В. М. и др. Корреляция литофаций в хроностратиграфических границах продуктивной толщи на региональном сейсмическом профиле Апшеронско-Балаханской тектонической зоны Южно-Каспийской впадины // Азербайджанское нефтяное хозяйство. 2015. № 3. С. 10–14.
8. Vincent S. J., Davies C. E., Richards K., Aliyeva E. Contrasting Pliocene fluvial depositional systems within the rapidly subsiding South Caspian basin; a case study of the palaeo-Volga and palaeo-Kura river systems in the Surakhany Suite, Upper Productive Series, onshore Azerbaijan // Marine and Petroleum Geology. 2010. Vol. 27. Issue 10. P. 2079–2106. https://dx.doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2010.09.007
9. Green T., Abdullayev N., Hossack J., Riley G., Roberts A. M. Sedimentation and subsidence in the South Caspian Basin, Azerbaijan // Geological Society, London, Special Publications, 2009. Vol. 312. P. 241–260. https://doi.org/10.1144/SP312.12
10. Mamedov P. Z., Mamedova L. P. Earth crust structure of the Southern and Middle Caspian Sea in the light of new seismic studies // The Modern Problems of Geology and Geophysics of Eastern Caucasus and the South Caspian Depression: 34th International Geological Congress Brisbane, Australia, August 5–10, 2012. Baku, 2012. P. 251–258.
11. Султанов А. Д., Горин В. А. Продуктивная толща западного борта Южно-Каспийской впадины (осадконакопление, минералогический состав, текстурно-структурные особенности, миграция нефти и газа). Баку: Азернешр, 1963. 290 с.
12. Allen M. B., Jones S., Ismail-Zadeh A., Simmons M. D., Anderson L. Onset of subduction as the cause of rapid Pliocene-Quaternary subsidence in the South Caspian basin // Geology. 2002. Vol. 30. Issue 9. P. 775–778. https://doi.org/10.1130/0091-7613(2002)030<0775:OOSATC>2.0.CO;2
13. Бабаев Ш. А. О стратиграфическом положении продуктивной толщи Азербайджана // Известия Национальной Академии Наук Азербайджана. Сер. «Науки о Земле». 2009. № 2. С. 26–30.
14. Абасов М. Т., Алияров Р. Ю., Гулиев И. С. Геолого-технологические основы увеличения запасов углеводородов Азербайджана // Азербайджанское нефтяное хозяйство. 2007. № 2 С. 20–29.
15. Дильбази З. Х., Асланов Т. И., Гаджиев Ф. М., Шихлинский З. А., Султанов П. Т. «Нефтегазоносность верхней части продуктивной толщи и верхнеплиоцен-антропогенных отложений Юго-Восточного Апшерона // Азербайджанское нефтяное хозяйство. 1993. № 7–8. С. 11–15.

Статья поступила в редакцию 13 декабря 2023 года

UDC 549.643+553.086 http://doi.org/10.21440/2307-2091-2024-1-53-58

Amphiboles from chromitites of the Yengaiskoye-1 ore occurence, Rai-Iz massif (Polar Urals)

Pavel Borisovich SHIRYAEV[1, 2*]
Nadezhda Vladimirovna VAKHRUSHEVA[1, 2]

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

Abstract

The relevance of the work is associated with the poor degree of knowledge of the influence of solid-phase crustal transformations of ultramafic rocks on the processes of localization of chromium mineralization.
The purpose of the work is to study amphibole microinclusions in ore-forming chrome-spinels of medium-chromium composition and compare them with those from high-chromium chrome-spinels.
Research methods. The chemical composition of minerals was determined using a CAMECA SX 100 electron probe microanalyzer (IGG Ural Branch of RAS, Ekaterinburg).
Results. The chemical composition of amphiboles from medium-chromium chromium ores of the Yengaiskoye-1 occurrence of the Rai-Iz massif has been studied. Amphiboles form inclusions in chrome spinel grains and long prismatic euhedral grains in the silicate part of the ore. It has been established that amphibole from inclusions in chrome spinel corresponds in composition to chrome pargasite with a Cr_2O_3 content of 3.39–3.68 wt. %. In the silicate part of chromitite, that is, in cement, amphibole is represented by tremolite with Cr_2O_3 – 0.80–0.90 wt. %. Comparison with the compositions of amphiboles from high-chromium chromitites of the Tsentralnoye deposit showed that tremolites and pargasites of both objects are in equilibrium in the content of Al_2O_3 and Na_2O, which indicates the isochemical nature of their formation.
Conclusions. The studied tremolites from chromitite cement and chromium pargasites from inclusions in the ore-forming chrome spinel are equilibrium in chemical composition and are of metamorphic origin (both in medium-chromium and high-chromium ores). Their capture occurred at the stage of crystallization or recrystallization of the ore-forming mineral. In medium-chromium chrome spinels, inclusions of silicates with a higher content of Cr_2O_3 and Na_2O than in high-chromium spinels are observed. This may indicate the role of amphibole as a chromium concentrator during ore formation.

***Keywords*:** amphiboles, chromitites, Yengaiskoye ore occurrence, Rai-Iz massif, Polar Urals.

Introduction

The study of silicate inclusions in chrome spinel grains from ultramafic rocks and chromitites is the topic of many modern studies [1–5]. Such inclusions usually contain both minerals typical of host ultramafic rocks: olivine, ortho- and clinopyroxene, amphibole, chlorite, and micas – phlogopite, aspidolite.

In our works, the chemical composition of minerals from inclusions in grains of ore-forming chromium spinel and the silicate part of high-chromium chromium ores of the Tsentralnoye deposit of the Rai-Iz massif was studied [6, 7]. It was found that the composition of amphibole from the silicate part and inclusions in grains of ore-forming spinels varies noticeably within one sample, corresponding to edenite and tremolite according to the modern classification of calcium amphiboles. In individual grains of the mineral, an increased content of Cr_2O_3 was determined – 0.12–1.80 wt. % [6]. Amphibole microinclusions in the ore-forming chrome spinels of the Tsentralnoye deposit are very rare, and the inclusions are mainly represented by chlorite, olivine and serpentine.

Research methods

Chemical analysis of minerals was performed on a CAMECA SX 100 electron probe microanalyzer at the Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, analysts D. A. Zamyatin, A. V. Mikheeva.

Research results and discussion

In this work, the composition of amphibole microinclusions from medium-chromium chromium ores of the Yengaiskoye-1 occurrence was studied. The ores have a disseminated-banded texture, a poorly-sparsely disseminated structure [8, 9]. The silicate part is represented by an aggregate of olivine grains 0.8–1.2 mm in size, among which there are individual long-prismatic euhedral amphibole crystals up to 2.5 mm in elongation. The long axes of the crystals are oriented according to the banding of the ore.

Microinclusions in chrome spinel grains are represented by chrome pargasite according to classifications [10, 11]. The mineral was found in the form of grains of irregular, angular shape, 20–30 microns in size (Fig. 1). Its chemical composition (Table 1, an. 1–5) is characterized by an extremely high chromium content for pargasite, 3.41–3.68 wt. %. This

✉Shiryayev@igg.uran.ru

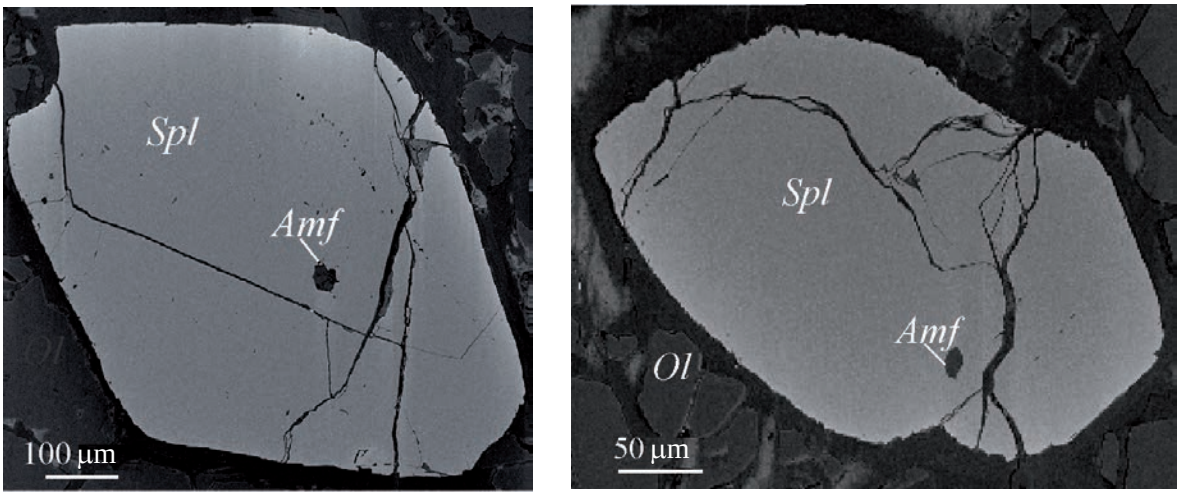


Figure 1. Spinel grains (*Spl*) with amphibole inclusions (*Amf*) in an olivine-serpentine matrix. BSE image, CAMECA SX-100
Рисунок 1. Зерна шпинели (*Spl*) с включениями амфибола (*Amf*) в оливин-серпентиновом матриксе. BSE-изображение, CAMECA SX-100

Table 1. Chemical composition of amphibole from medium-chromium chrome ore of the Yengaiskoye ore occurrence, wt. %
Таблица 1. Химический состав амфибола из среднехромистой хромовой руды рудопроявления Енгайское, мас. %

Oxides and elements	Analyses							
	1к	2ц	3к	4	5ц	6	7	8
SiO_2	43,02	42,38	43,79	43,81	43,56	58,15	57,10	57,28
TiO_2	0,67	0,60	0,68	0,51	0,51	0,07	0,07	0,02
Al_2O_3	11,70	11,29	11,11	11,20	11,16	0,36	0,43	0,33
Cr_2O_3	3,58	3,39	3,41	3,54	3,68	0,20	0,71	0,12
FeO	1,93	1,91	2,56	2,13	2,42	0,86	0,90	0,80
MgO	18,92	20,57	18,76	18,74	19,09	23,90	23,38	23,77
MnO	0,05	–	0,03	0,05	0,05	–	0,03	–
CaO	12,58	11,28	11,97	11,96	12,91	13,03	12,45	12,05
Na_2O	3,52	3,07	3,33	3,13	3,49	0,31	0,64	0,54
K_2O	0,22	0,22	0,26	0,26	0,26	0,02	0,03	0,03
F	0,29	–	0,16	0,06	–	–	0,09	–
Cl	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,03	–
Total	96,49	94,72	96,07	95,41	97,14	96,91	95,86	94,92
Formula coefficients (calculation for 23 oxygen atoms)								
Si	6,23	6,20	6,35	6,37	6,27	7,97	7,93	7,99
Ti	0,07	0,07	0,07	0,06	0,06	0,01	0,01	–
Al	2,00	1,95	1,90	1,92	1,89	0,06	0,07	0,05
Al^{IV}	1,29	1,34	1,19	1,17	1,26	0,03	0,07	0,01
Al^{VI}	0,71	0,61	0,71	0,75	0,63	0,02	–	0,05
Cr	0,41	0,39	0,39	0,41	0,42	0,02	0,08	0,01
Fe	0,23	0,23	0,31	0,26	0,29	0,10	0,10	0,09
Mg	4,08	4,49	4,05	4,06	4,09	4,88	4,84	4,94
Mn	0,01	–	–	0,01	0,01	–	–	–
Ca	1,95	1,77	1,86	1,86	1,99	1,91	1,85	1,80
Na	0,99	0,87	0,94	0,88	0,97	0,08	0,17	0,15
K	0,04	0,04	0,05	0,05	0,05	–	0,01	0,01

corresponds to 0.39–0.42 formula units of Cr in terms of 23 oxygen atoms with the upper limit for the inclusion of cations of the element in the mineral structure of 0.43±0.06 f. u. [12]. From the center to the edge of the mineral grains, the amount of Cr_2O_3 and Al_2O_3 increases by 0.2 and 0.4 wt.%, respectively, and the content of Na_2O increases by 0.5 wt. %.

In the silicate part of the studied chromitite, i. e. in the cement, individual prismatic tremolite grains are observed, up

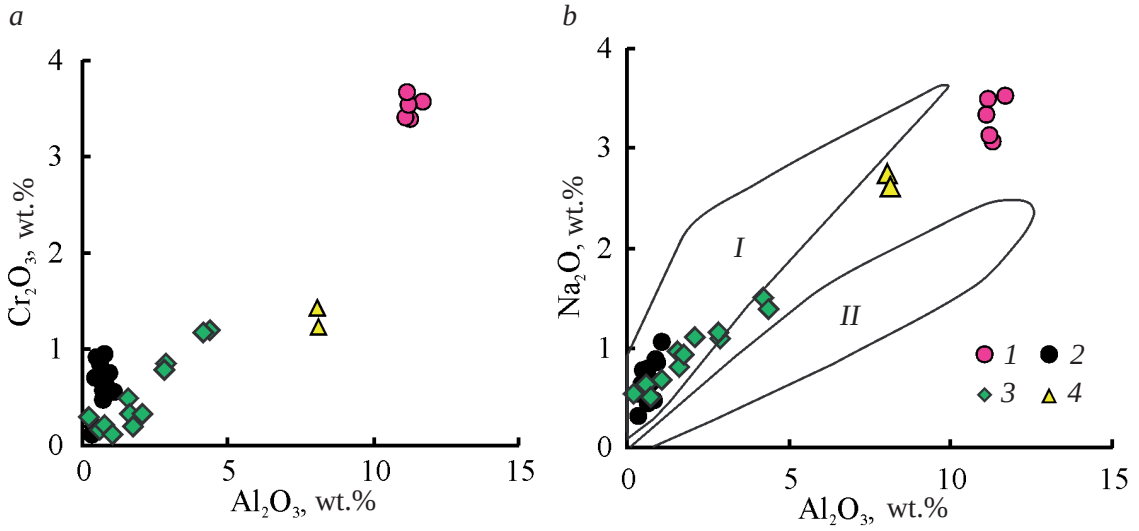


Figure 2. Dependences of the contents of Cr_2O_3 on Al_2O_3 and Na_2O on Al_2O_3 in amphiboles from chromitites and plagioclasites of the Rai-Iz massif: *1* – chromium pargasite from an inclusion in the ore-forming spinel of chromitite of the Yengaiskoe-1 ore occurrence; *2* – tremolite from the silicate part of chromitite of the Yengaiskoe-1 ore occurrence; *3*, *4* – amphiboles from chromitites of the Tsentralnoye deposit: *3* – silicate part, *4* – inclusions in chrome spinel. Composition fields of amphiboles from ultramafic rocks hosting mineralization: *I* – high-chromium type; *II* – aluminous type (according to [13])

Рисунок 2. Зависимости содержаний Cr_2O_3 от Al_2O_3 и Na_2O от Al_2O_3 в амфиболах из хромититов и плагиоклазитов массива Рай-Из: *1* – хромовый паргасит из включения в рудообразующей шпинели хромитита рудопроявления Енгайское-1; *2* – тремолит из силикатной части хромитита рудопроявления Енгайское-1; *3*, *4* – амфиболы из хромититов месторождения Центральное: *3* – силикатная часть, *4* – включения в хромшпинелиде. Поля составов амфиболов из ультрамафитов, вмещающих оруденение: *I* – высокохромистого типа; *II* – глиноземистого типа (по [13])

to 0.5–0.7 mm in diameter. The mineral contains 0.5–1 wt. % Cr_2O_3, Al_2O_3, Na_2O, and is also depleted in TiO_2 to 0.07 wt. % (Table 1, an. 6–8).

The compositions of the studied amphiboles from inclusions in chromitite are distinguished by the highest content of Al_2O_3, Cr_2O_3 and Na_2O among those common in the ophiolite massifs of the Polar Urals (Fig. 2, *a*, *b*). The diagram (Fig. 2, *b*) shows the compositional fields of amphiboles from ultramafic rocks of the Rai-Iz and Voykar-Syninsky massifs, which host mineralization of high-chromium (I) and aluminous (II) chemical types [13]. The compositions of amphiboles from the silicate part of chromitites fall into field I, and from inclusions in chrome spinel grains they are located between fields I and II. In Fig. 2, *b*, the compositions of amphiboles form a single linear sequence, which is associated with the peculiarity of the incorporation of Na^+ into the tremolite structure, which is accompanied by the replacement of Si^{4+} by Al^{3+} [14].

According to olivine-spinel thermometry data given in [3], the central parts of the largest grains of chrome spinel from chromitite containing inclusions of chrome pargasite of the Yengaiskoe-1 ore occurrence were formed at a temperature of 670–690 °C and an oxygen fugacity of 1.1–1. 4 log. units above the FMQ buffer.

Chromium pargasites, similar in composition to those studied in our work, are known in chromitites of the Cuba, Oman, and Luobus massifs [4, 6, 15]. Their origin has been interpreted in various ways: (1) as the result of crystallization from a volatile-rich melt; (2) during the formation of chromitites as a result of the interaction of harzburgite and magma rich in incompatible elements; (3) during metasomatic processes in the upper mantle [4, 6, 15]. The low temperature of olivine-spinel equilibrium established in our work calls into question the possibility of amphibole formation in the magmatic process.

Conclusions

The equilibrium change in the content of Na_2O and Al_2O_3 in the studied amphiboles indicates the constancy and unity of the conditions for their formation. Tremolite is typical of metamorphic parageneses. It follows that the capture of inclusions could occur at the stage of crystallization or recrystallization of the ore-forming mineral under metamorphic conditions. In medium-chromium chrome spinels, inclusions of silicates with a higher content of Cr_2O_3 and Na_2O than in high-chromium spinels are observed. This may indicate the role of amphibole as a chromium concentrator during ore formation.

The research was carried out at the expense of the Russian Science Foundation Grant no. 22-17-00027, https://rscf.ru/project/22-17-00027/

REFERENCES

1. Arai S., Miura M. 2016, Formation and modification of chromitites in the mantle. *Lithos*, vol. 264, pp. 277–295. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2016.08.039

2. Borisova A. Y., Ceuleneer G., Kamenetsky V. S., Arai S., Béjina F., Abily B., Bindeman I. N., Polvé M., De Parseval Ph., Aigouy T., Pokrovski G. S. 2012, A new view on the petrogenesis of the Oman ophiolite chromitites from microanalyses of chromite-hosted inclusions. *Journal of Petrology*, vol. 53, issue 12, pp. 2411–2440. https://doi.org/10.1093/petrology/egs054

3. Li C., Ripley E. M., Sarkar A., Shin D., Maier W. D. 2005, Origin of phlogopite-orthopyroxene inclusions in chromites from the Merensky Reef of the Bushveld Complex, South Africa. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, vol. 150, pp. 119–130. https://doi.org/10.1007/s00410-005-0013-z
4. Lorand J. P., Ceuleneer G. 1989, Silicate and base-metal sulphide inclusions in chromites from the Maqsad area (Oman ophiolite, Gulf of Oman): a model for entrapment. *Lithos*, vol. 22, issue 4, pp. 173–190. https://doi.org/10.1016/0024-4937(89)90054-6
5. Melcher F., Grum W., Simon G., Thalhammer T. V., Stumpfl E. F. 1997, Petrogenesis of the ophiolitic giant chromite deposits of Kempirsai, Kazakhstan: a study of solid and fluid inclusions in chromite. *Journal of Petrology*, vol. 38, issue 10, pp. 1419–1458. https://doi.org/10.1093/petroj/38.10.1419
6. Vakhrusheva N. V., Bogdanova A. R. 2016, Amphiboles from chromitites and wall-mounted ultrabasic rocks of the Tsentralnoye deposit. *Vestnik Ural'skogo otdeleniya Rossiyskogo mineralogicheskogo obshchestva* [Bulletin of the Ural Branch of the Russian Mineralogical Society], no. 13, pp. 18–22. (*In Russ.*)
7. Vakhrusheva N. V., Shiryaev P. B., Stepanov A. E., Bogdanova A. R. 2017, Petrology and chromite content of the Rai-Iz ultramafic massif. Ekaterinburg, 265 p. (*In Russ.*)
8. Nikolskaya N. E., Kazennova A. D., Nikolaev V. I. 2021, Typomorphism of ore-forming chrome spinel in chrome ore deposits. *Mineral'noye syr'ye* [Mineral raw materials]. Moscow, no. 42, 238 p. (*In Russ.*)
9. Selivanov R. A., Vakhrusheva N. V. 2010, Features of the localization of chromium mineralization of the Yengaiskoye ore field. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Gornyy zhurnal* [News of higher educational institutions. Mining magazine], no. 2, pp. 91–98. (*In Russ.*)
10. Hawthorne F. C., Oberti R., Harlow G. E., Maresch W. V., Martin R. F., Schumacher J. C., Welch M. D. 2012, Nomenclature of the amphibole supergroup. *American Mineralogist*, vol. 97, issue 11–12, pp. 2031–2048. http://dx.doi.org/10.2138/am.2012.4276
11. Leake B. E., Woolley A. R., Arps C. E. S., Birch W. D., Gilbert M. C., Grice J. D., Hawthorne F. C., Kato A., Kisch H. J., Krivovichev V. G., Linthout K., Laird J., Mandarino J. A., Maresch W. V., Nickel E. H., Rock N. M. S., Schumacher J. C., Smith D. C., Stephenson N. C. N., Ungaretti L., Whittaker E. J. W., Guo Y. 1997, Nomenclature of amphiboles: Report of the subcommittee on amphiboles of the International Mineralogical Association, Commission on New Minerals and Mineral Names. *Canadian Mineralogist*, vol. 35, pp. 219–246.
12. Fialips-Guédon C. I., Robert J. L., Delbove F. 2000, Experimental study of Cr incorporation in pargasite. *American Mineralogist*, vol. 85, no. 5–6, pp. 687–693. http://dx.doi.org/10.2138/am-2000-5-605
687–693.
13. Vakhrusheva N. V. 1996, Metamorphism of chromite-bearing ultrabasic rocks of the Polar Urals. PhD thesis. Ekaterinburg, 24 p. (*In Russ.*)
14. Zingg A. J. 1993, Intra- and intercrystalline cation-exchange reactions in zoned calcic amphibole from the Bushveld Complex. *The Canadian Mineralogist*, vol. 31, pp. 649–663.
15. Proenza J. A., Melgarejo J. C., Gervilla F., Rodríguez-Vega A., Martínez R. D., Ruiz-Sánchez R., Lavaut W. 2003, Coexistence of Cr- and Al-rich ophiolitic chromitites in a small area: The Sagua de Tánamo district, Eastern Cuba. *Mineral Exploration and Sustainable development*. Rotterdam, vol. 1, pp. 631–634.

The article was received on Decemer 01, 2023

УДК 549.643+553.086 http://doi.org/10.21440/2307-2091-2024-1-53-58

Амфиболы из хромититов рудопроявления Енгайское-1 массива Рай-Из (Полярный Урал)

Павел Борисович ШИРЯЕВ[1, 2*]
Надежда Владимировна ВАХРУШЕВА[1, 2]

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

Аннотация

Актуальность работы связана со слабой степенью изученности влияния твердофазных коровых преобразований ультрамафитов на процессы локализации хромового оруденения.

Цель работы – исследование микровключений амфибола в рудообразующих хромшпинелидах среднехромистого состава и их сравнение с таковыми из высокохромистых хромшпинелидов.

Методы исследования. Химический состав минералов определен при помощи электронно-зондового микроанализатора CAMECA SX 100 (ИГГ УрО РАН, г. Екатеринбург).

Результаты. Исследован химический состав амфиболов из среднехромистых хромовых руд проявления Енгайское-1 массива Рай-Из. Амфиболы образуют включения в зернах хромшпинелида и длиннопризматические идиоморфные зерна в силикатной части руды. Установлено, что амфибол из включений в хромшпинелиде соответствует по составу хромовому паргаситу с содержанием Cr_2O_3 – 3,39–3,68 мас. %. В силикатной части хромитита, т. е. в цементе, амфибол представлен тремолитом с Cr_2O_3 – 0,80–0,90 мас. %. Сопоставление с составами амфиболов из высокохромистых хромититов месторождения Центральное показало, что тремолиты и паргаситы обоих объектов равновесны по содержанию Al_2O_3 и Na_2O, что свидетельствует об изохимизме их образования.

Выводы. Исследованные тремолиты из цемента хромитита и хромовые паргаситы из включений в рудообразующем хромшпинелиде равновесны по химическому составу и имеют метаморфическое происхождение (как в среднехромистых, так и в высокохромистых рудах). Их захват происходил на этапе кристаллизации или перекристаллизации рудообразующего минерала. В среднехромистых хромшпинелидах наблюдаются включения силикатов с более высоким содержанием Cr_2O_3 и Na_2O, чем в высокохромистых. Это может указывать на роль амфибола как концентратора хрома при рудообразовании.

***Ключевые слова*:** амфиболы, хромититы, Енгайское рудопроявление, массив Рай-Из, Полярный Урал.

Исследования проведены за счет гранта Российского научного фонда № 22-17-00027, https://rscf.ru/ project/22-17-00027/

ЛИТЕРАТУРА

1. Arai S., Miura M. Formation and modification of chromitites in the mantle // Lithos. 2016. Vol. 264. P. 277–295. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2016.08.039
2. Borisova A. Y., Ceuleneer G., Kamenetsky V. S., Arai S., Béjina F., Abily B., Bindeman I. N., Polvé M., De Parseval Ph., Aigouy T., Pokrovski G. S. A new view on the petrogenesis of the Oman ophiolite chromitites from microanalyses of chromite-hosted inclusions // Journal of Petrology. 2012. Vol. 53. Issue 12. P. 2411–2440. https://doi.org/10.1093/petrology/egs054
3. Li C., Ripley E. M., Sarkar A., Shin D., Maier W. D. Origin of phlogopite-orthopyroxene inclusions in chromites from the Merensky Reef of the Bushveld Complex, South Africa // Contributions to Mineralogy and Petrology. 2005. Vol. 150. P. 119–130. https://doi.org/10.1007/s00410-005-0013-z
4. Lorand J. P., Ceuleneer G. Silicate and base-metal sulphide inclusions in chromites from the Maqsad area (Oman ophiolite, Gulf of Oman): a model for entrapment // Lithos. 1989. Vol. 22. Issue 3. P. 173–190. https://doi.org/10.1016/0024-4937(89)90054-6
5. Melcher F., Grum W., Simon G., Thalhammer T. V., Stumpfl E. F. Petrogenesis of the ophiolitic giant chromite deposits of Kempirsai, Kazakhstan: a study of solid and fluid inclusions in chromite // Journal of Petrology. 1997. Vol. 38. Issue 10. P. 1419–1458. https://doi.org/10.1093/petroj/38.10.1419
6. Вахрушева Н. В., Богданова А. Р. Амфиболы из хромититов и околорудных ультрамафитов месторождения Центральное (массив Рай-Из) // Вестник УрО РМО. 2016. № 13. С. 18–22.
7. Вахрушева Н. В., Ширяев П. Б., Степанов А. Е., Богданова А. Р. Петрология и хромитоносность ультраосновного массива Рай-Из (Полярный Урал). Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2017. 265 с.
8. Никольская Н. Е., Казеннова А. Д., Николаев В. И. Типоморфизм рудообразующего хромшпинелида месторождений хромовых руд // Минеральное сырье. М.: ФГБУ «ВИМС», 2021. № 42. 238 с.
9. Селиванов Р. А., Вахрушева Н. В. Особенности локализации хромового оруденения Енгайского рудного поля // Известия вузов. Горный журнал. 2010. № 2. С. 91–98.
10. Hawthorne F. C., Oberti R., Harlow G. E., Maresch W. V., Martin R. F., Schumacher J. C., Welch M. D. Nomenclature of the amphibole supergroup // American Mineralogist. 2012. Vol. 97. Issue 11–12. P. 2031–2048. http://dx.doi.org/10.2138/am.2012.4276

✉Shiryayev@igg.uran.ru

11. Leake B. E., Woolley A. R., Arps C. E. S., Birch W. D., Gilbert M. C., Grice J. D., Hawthorne F. C., Kato A., Kisch H. J., Krivovichev V. G., Linthout K., Laird J., Mandarino J. A., Maresch W. V., Nickel E. H., Rock N. M. S., Schumacher J. C., Smith D. C., Stephenson N. C. N., Ungaretti L., Whittaker E. J. W., Guo Y. Nomenclature of amphiboles: Report of the subcommittee on amphiboles of the International Mineralogical Association, Commission on New Minerals and Mineral Names // Canadian Mineralogist. 1997. Vol. 35. P. 219–246.
12. Fialips-Guédon C.-I., Robert J.-L., Delbove F. Experimental study of Cr incorporation in pargasite // American Mineralogist. 2000. Vol. 85. No. 5–6. P. 687–693. http://dx.doi.org/10.2138/am-2000-5-605
13. Вахрушева Н. В. Метаморфизм хромитоносных гипербазитов Полярного Урала: автореф. дис… канд. геол.-минерал. наук. Екатеринбург, 1996. 24 с.
14. Zingg A. J. Intra- and intercrystalline cation-exchange reactions in zoned calcic amphibole from the Bushveld Complex // The Canadian Mineralogist. 1993. Vol. 31. P. 649–663.
15. Proenza J. A., Melgarejo J. C., Gervilla F., Rodríguez-Vega A., Martínez R. D., Ruiz-Sánchez R., Lavaut W. Coexistence of Cr- and Al-rich ophiolitic chromitites in a small area: The Sagua de Tánamo district, Eastern Cuba // Mineral Exploration and Sustainable development. Rotterdam: Millpress Science Publishers, 2003. Vol. 1. P. 631–634.

Статья поступила в редакцию 01 декабря 2023 года

УДК 551.24 http://doi.org/10.21440/2307-2091-2024-1-59-66

О генезисе соляных структур Верхнекамского месторождения калийных солей

Владимир Викторович ФИЛАТОВ[1*]
Любовь Анатольевна БОЛОТНОВА[2**]

[1]Владимирский государственный университет им. А. Г. и Н. Г. Столетовых, Владимир, Россия
[2]Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия

Аннотация

Актуальность темы. Одной из важнейших задач геологических исследований является задача установления генезиса любого геологического образования, в особенности генезиса геологических структур, поскольку с последними не только пространственно, но и генетически связаны месторождения различных полезных ископаемых. Для решения этой задачи необходимо ответить как минимум на два вопроса: что служит двигателем того процесса, который способствовал образованию рассматриваемой геологической структуры, и каковы условия, в которых произошло формирование структуры. Чтобы ответить на эти вопросы, необходимо иметь представления о петрофизических свойствах геологической среды, о термодинамических условиях структурообразования, о региональной геотектонической обстановке, о механизмах деформирования геологической среды, о структурном парагенезисе, т. е. о совокупности тектонических элементов, возникающих при структурообразовании, и о его полихронности, или временной «развертке» палеотектонической обстановки структурообразования.

Цель исследования заключается в определении генезиса основных соляных структур Верхнекамского месторождения калийных солей: соляных валов, прогибов и соляных поднятий, или куполов.

Методы исследования. Решение задачи по определению генезиса соляных структур было осуществлено путем комплексного качественного и количественного анализа данных геолого-геофизических методов, выполненных на территории Верхнекамского месторождения калийных солей, и прежде всего результатов детальных площадных и высокоточных гравиметрической и аэромагнитной съемок масштабов: 1 : 25 000 и 1 : 10 000 и крупнее.

Результаты исследования. В результате выполненных исследований было показано, что в условиях Верхнекамского месторождения калийных солей основным фактором формирования соляных структур являются постседиментационные движения блоков, происходившие и происходящие в подсолевой толще.

***Ключевые слова*:** Верхнекамское месторождение калийных солей, генезис соляных структур, геолого-геофизические данные.

Введение

Тектонические структуры земной коры подобны и образуют иерархические системы [1]. Поэтому тектоническая делимость геологической среды не случайна, а закономерна. Эта закономерность проявляется в том, что структурно-тектонические блоки или объекты более низких рангов являются составными частями блоков и объектов более высоких порядков или рангов. В полной мере это относится и к тому фрагменту земной коры, в котором находится Верхнекамское месторождений калийных солей (ВКМКС), а это в порядке понижения рангов: Предуральский краевой прогиб (ПКП), Соликамская впадина (СВ) и структурно-тектонические объекты ВКМКС различного генезиса и различных рангов (рис. 1).

Предуральский краевой прогиб (ПКП) является крупной синклинальной структурой, расположенной на границе Восточно-Европейской платформы и Складчатого Урала. Западной границей ПКП служит Красноуфимский глубинный разлом [3, 4], восточной – Западно-Уральский глубинный разлом, северной – Предтиманский глубинный разлом, южной – Колво-Чусовская седловина (рис. 1).

Соликамская впадина (СВ) – это составная часть ПКП. По условиям залегания докунгурских отложений СВ представляет собой обособленный блок земной коры, который отличается от соседних блоков внутренним строением и, как следствие, характером всех геофизических полей [5]. Структурно-тектоническое положение СВ имеет пространственную связь с глубинным строением Пермского Приуралья. Положение глубинных разломов (рис. 1) в плане совпадает с границами СВ: на западе – это Красноуфимский меридиональный разлом, на востоке – Западно-Уральский меридиональный, на севере – Предтиманский северо-за-

✉filatov47@bk.ru
**Lyubov.Bolotnova@m.ursmu.ru

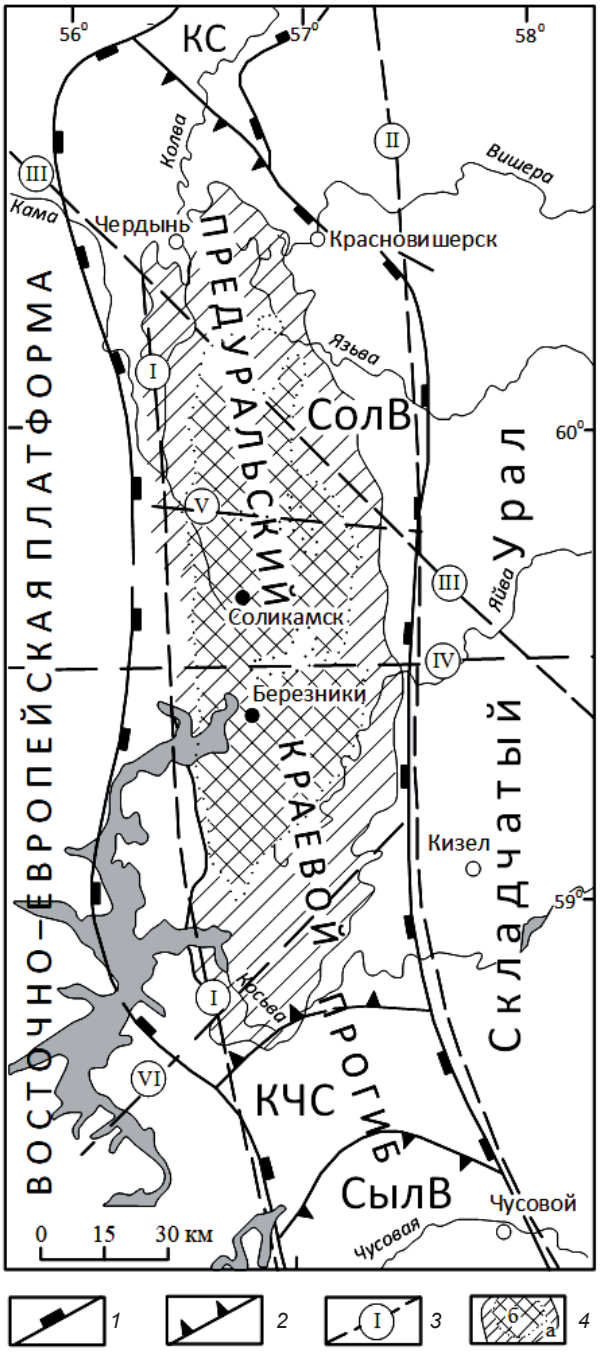


Рисунок 1. Структурно-тектоническое положение Соликамской впадины [2]: *1* – границы Предуральского краевого прогиба; *2* – границы седловин и впадин: *КС* – Колвинская седловина, *СолВ* – Соликамская впадина, *КЧС* – Колвинско-Чусовская седловина, *СылВ* – Сылвенская впадина; *3* – глубинные разломы: Красноуфимский (*I*), Западно-Уральский (*II*), Предтиманский (*III*), Дуринский (*IV*), Боровицкий (*V*), Северо-восточный (*VI*); *4* – площади распространения соляной (*а*) и калийной (*б*) залежей

Figure 1. Structural and tectonic position of the Solikamsk depression [2]: *1* – boundaries of the Pre-Ural marginal trough; *2* –boundaries of saddles and depressions: *KS* – Kolva saddle, *SolV* – Solikamsk depression, *KChS* – Kolva-Chusovskaya saddle, *SylV* – Sylva depression; *3* – deep faults: Krasnoufimsky (*I*), West Ural (*II*), Predtimansky (*III*), Durinsky (*IV*), Borovitsky (*V*), North-Eastern (*VI*); *4* –areas of distribution of salt (a) and potash (*b*) deposits

падного простирания, на юге – разлом северо-восточного простирания, не очень отчетливо выраженный в геофизических поля (рис. 1, № VI).

Границы распространения солей в СВ лучше всего совпадают с положением разломов, чем с границами впадины. Отсюда можно сделать вывод, что ВКМКС образовалось в пределах тектонически активного блока, который испытывал в основном нисходящие движения по ограничивающим его глубинным разломам. Эти разломы сформировались в позднепротерозойское время и развивались унаследованно вплоть до верхней перми и триаса, а возможно, и в более позднее время [6]. Из всех глубинных разломов различного простирания и кинематического типа главную роль в процессах структурообразования играли и продолжают играть разломы субмеридионального и субширотного простирания [7, 8].

Анализ региональной структурно-тектонический обстановки в районе ВКМКС дает основание сделать вывод о том, что эта обстановка оказала существенное влияние на формирование соляных структур (валы, купола, поднятия, прогибы и др.) в пределах ВКМКС, т. е. определила их генезис.

Методология исследования

Методология определения генезиса соляных структур ВКМКС основывается на анализе всей совокупности геолого-геофизических данных, характеризующих строение, свойства, закономерности структурообразования и деформации геологической среды. Из геофизических методов приоритет отдан результатам площадных и высокоточных методов: гравиразведка масштаба 1 : 25 000 и аэромагниторазведка масштаба 1 : 10 000, поскольку съемки этими методами выполнены на всей территории ВКМКС. Данные других геофизических методов [9–12] характеризуют только малые по площади участки территории месторождения, поэтому использовать их для решения задачи о генезисе соляных структур затруднительно.

Результаты исследования

Вопросы генезиса соляных структур ВКМКС ранее были изложены в работах [2, 13, 14].

В [12] полностью отрицается влияние подсолевых отложений и их блоковое строение на формирование соляных структур. По мнению [13], нагнетание соли в ядра брахиантиклиналей и куполов происходит под действием неравномерной статической нагрузки на соляной пласт, создаваемой более плотными породами надсоляной толщи в местах развития глубоких врезов речных долин.

В [14] полагают, что движущей силой образования соляных структур служит широтное давление масс горных пород со стороны складчатого Урала на осадочный чехол, который был сорван и в виде надвиговых пластин перемещен в западном направлении. Во фронтальных частях этих пластин и произошло формирование соляных валов и антиклинальных складок при полном отсутствии влияния на эти процессы субвертикальных разломов различных рангов. Вывод о таком механизме образования соляных структур более чем сомнителен, поскольку в [2] убедительно доказано, что в осадочной толще СВ надвиговых структур нет.

Соляные валы и прогибы

Сопоставление планового положения крупных соляных структур типа валов и прогибов противоречит выводам, сделанным в [13, 14] (рис. 2): Красновишерский вал точно совпадает в плане с Красноуфимским разломом; хорошая плановая сходимость характерна для границ

Камского и Осокинского прогибов и сопряженных с ними поднятий; в меньшей степени такая сходимость проявлена для границ Дурыманского прогиба и Тверитинской мульды, но общая плановая связь разломов и соляных структур и здесь является достаточно тесной.

Красновишерский вал в плане представляет собой цепочку соляных поднятий, или брахиантиклиналей (Дубровская, Порошинская, Пыскорская, Усольская, Белопашнинская, Сыньвинская), характерных для структурного парагенезиса разломов типа сброса, каким является Красноуфимский разлом (рис. 3) [3]. Именно в зонах разломов такого кинематического типа образуются цепочки овальных в плане участков повышенной трещиноватости, оси которых вытянуты вдоль разлома, размеры в плане одинаковы, а расстояние между участками деструкции приблизительно одинаково [15, 16]. Следовательно, соляные брахиантиклинали Красновишерского вала генетически связаны с внутриразломными участками деструкции и с возникающими в их пределах такими тектонодинамическими процессами, которые являются причиной галокинеза и развития соляных куполов.

Субмеридиональные разломы являются структурообразующими для солей в отличие от субширотных: Дуринского и Боровицкого. Эти разломы играют деструктивную роль. Прогибы по кровле солей в зонах этих разломов образовались в результате интенсивного выщелачивания солей подсолевыми водами, мигрировавшим по системам субвертикальных трещин [4]. Оба разлома являются горизонтальными сдвигами, в зонах которых сформировались системы трещин отрыва, пронизывающих всю толщу сдвигаемых пород и, как следствие, повышающих проницаемость этой толщи. Структурное значение Дуринского разлома проявлено также в том, что он делит СВ на две части: северную и южную, различающиеся положением разломов и соляных структур.

Горизонтальные сдвиговые разломы характерны не только для Дуринского и Боровицкого прогибов. Они имеют более широкое развитие в пределах СВ в отличие от других солеродных бассейнов, в пределах которых блоковые движения происходили в основном в вертикальном направлении и приводили к образованию уступов большой амплитуды. Для СВ залегание осадочной толщи спокойное. Движение блоков здесь в послепермское время происходило в горизонтальном направлении. Об этом свидетельствуют и геофизические данные, и результаты математического моделирования поля напряжений [17, 18]. Отсюда можно сделать вывод о том, что в нынешних условиях в пределах ВКМКС основным кинематическим типом разрывов является горизонтальный сдвиг.

Таким образом, для ВКМКС соляная тектоника наиболее отчетливо выражена в зонах Красноуфимского и Дуринского разломов фундамента субмеридиональной и субширотных ориентировок, что является общей закономерностью для всех солеродных бассейнов [14].

Существенным фактором, влияющим на образование соляных структур, является пластичность солей, т. е. их подвижность или способность к перемещению, на которую влияет галокинез, неоднородность поля напряжений, повышенная трещиноватость надсолевой толщи и современные движения:

а) галокинезные явления обуславливаются пластичностью соли, которая возрастает с увеличением влажности, температуры и давления. На ВКМКС соль находится в пластическом состоянии [12], но ее пластичность неодинакова в зонах разломов и за их пределами. В [14] показано, что при движении блоков из подсолевых отложе-

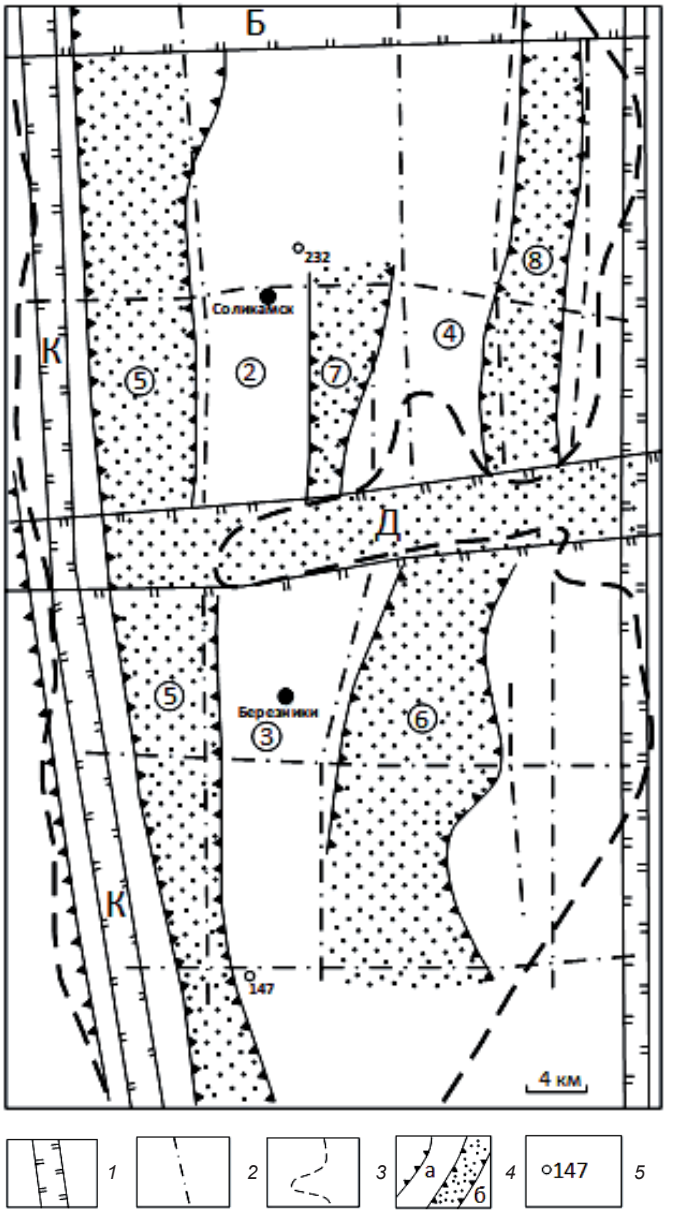


Рисунок 2. Схема положения разломов и региональных соляных структур: *1* – зоны глубинных разломов: *К* – Красноуфимского, *Д* – Дуринского, *Б* – Боровицкого; *2* – осевые линии зон внутриблоковых разломов; *3* – границы калийной залежи; *4* – границы крупных положительных (*а*) и отрицательных (*б*) структур по кровле солей: *2* – Соликамское поднятие, *3* – Березниковское поднятие, *4* – Харюшинское поднятие, *5* – Камский прогиб, *6* – Дурымановский прогиб, *7* – Тверитинская мульда, *8* – Осокинский прогиб; *5* – положение скважин и их номера

Figure 2. Diagram of the position of faults and regional salt structures: *1* – zones of deep faults: *K* – Krasnoufimsky, *D* – Durinsky, *B* – Borovitsky; *2* – axial lines of zones of intrablock faults; *3* – boundaries of potash deposits; *4* – boundaries of large positive (*a*) and negative (*b*) structures on the roof salts: *2* – Solikamsk uplift, *3* – Berezniki uplift, *4* – Haryushin uplift, *5* – Kama deflection, *6* – Durymansky deflection, *7* – Tveritinskaya mulda, *8* – Osokinsky deflection; *5* – the position of wells and their numbers

ний поступает вода, которая превращает соляную толщу в зоне разлома в подвижный флюид. На ВКМКС об этом свидетельствуют многие данные [2]. Подсолевые воды, мигрируя по субвертикальным тектоническим нарушениям, образуют в низах соляной толщи системы внутрисоляных трещин, заполненных водой. Так, с повышением влажности растут пластичность и подвижность соли в зоне разлома;

б) вторым фактором, определяющим пластичность соли и ее переток, является пространственное изменение поля напряжений. Неоднородности геологической среды, особенно разрывные нарушения, изменяют поле напряжения. Вблизи нарушения образуются локальные участки пониженного напряжения, на удалении от него происходит увеличение напряжения [19]. В результате этого градиент напряжения в зоне нарушения может в 5–6 раз превышать литостатическое давление. Благодаря большой разнице градиентов напряжения соль может перетекать в разломную зону;

в) повышенная трещиноватость пород надсолевой толщи в зоне разлома понижает ее прочность и способствует явлению вздутия солей и воздымания ими вышележащих толщ;

г) блоковые движения не только способствуют образованию соляных структур, но и обеспечивают их развитие во времени, т. е. рост. Этот процесс имеет место и на ВКМКС в связи с активизацией разломов на Урале и в Приуралье в новейшее время [20, 21]. Разломы, особенно ортогональной системы, выявленные на ВКМКС нередко пространственно, совпадают в плане с морфоструктурами новейшего времени (рис. 3).

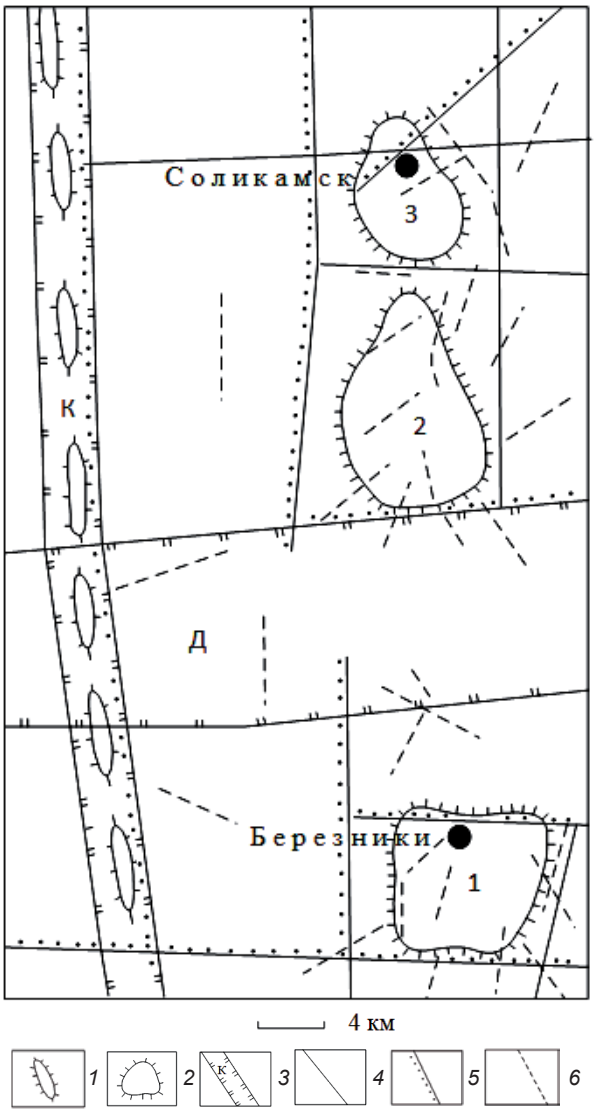


Рисунок 3. Схема положения локальных соляных поднятий и разломов в центральной части ВКМКС: *1* – брахиантиклинали в зоне Красноуфимского разлома; *2* – соляные купола: *1* – Березниковский, *2* – Поповский, *3* – Рудничный; *3* – зоны глубинных разломов: *К* – Красноуфимского, *Д* – Дуринского; *4* – осевые линии зон внутриблоковых разломов; *5* – участки разломов, совпадающие с границами новейших морфоструктур; *6* – положение линейных зон повышенной трещиноватости в надсолевой толще

Figure 3. Diagram of the position of local salt uplifts and faults in the central part of the VKMKS: *1* – brachianticlines in the Krasnoufimsky fault zone; *2* – salt domes: *1* – Bereznikovsky, *2* – Popovsky, *3* – Rudnichny; *3* – deep fault zones: *K* – Krasnoufimsky, *D* – Durinsky; *4* – axial lines of zones intra-block faults; *5* – fault sections coinciding with the boundaries of the newest morphostructures; *6* – the position of linear zones of increased fracturing in the suprasalt thickness

Соляные купола, или поднятия

Соляными структурами ВКМКС более высокого порядка по отношению к соляным валам являются локальные соляные поднятия, или соляные купола. Формирование этих структур определяется одними и теми же факторами, что и формирование соляных валов. Но характер пространственного взаимоотношения поднятий и разломов двояк. Различают:

– купола, расположенные внутри разломных зон;

– купола, находящиеся в небольших блоках, ограниченных субпараллельными парами сближенных разломов взаимно перпендикулярных ориентировок (рис. 3).

Березниковский, Поповский, Рудничный (рис. 3) и другие соляные купола расположены цепочкой вдоль Клепиковского, Корельско-Тюлькинского, Соликамского и Харюшинского валообразных поднятий на севере и юге ВКМКС (рис. 2). В отличие от брахиантиклиналей Красновишерского вала, центры куполов совпадают не с осевыми линиями разломов, а с центральными частями соответствующих блоков. Площади куполов и блоков на уровне эрозионного среза сопоставимы, а контуры куполов хорошо совпадают с границами блоков, особенно это соответствие характерно для Березниковского купола.

Плановое соответствие контуров куполов и блоков не есть закономерность, присущая только ВКМКС. Аналогичная ситуация наблюдается и в Припятском прогибе, где соляные купола расположены над активными приподнятыми и опущенными блоками подсолевого основания [11]; в Бельской впадине ПКП; в Южном Приуралье; в Восточной Сибири и в других регионах. Следовательно, важным фактором в галокинезе является не направление смещения блоков (вверх или вниз), а тектоническая активность блоков. В полной мере это имеет отношение и к блокам с Березниковским, Поповским и Рудничным куполами, поскольку как минимум два из четырех разломов, ограничивающих каждый блок, отчетливо картируются в современном рельефе поверхности Земли (рис. 3).

Связь активных блоков с куполами инициирует вопрос о том, растут ли купола в настоящее время. По мнению авторов [12], галокинезные движения в виде вертикального всплывания соляных колонн на ВКМКС начались в среднем плейстоцене и продолжаются до настоящего времени. Оценка этого явления осуществляется прямым и косвенным методами.

Прямой метод, т. е. маркшейдерские исследования, показывает [22], что соляные купола растут со скоростью 0,55 мм/год. Косвенными методами являются геофизические исследования. По результатам геофизических исследований в пределах Поповского поднятия закартирована система линейных трещинных зон радиальной ориентировки, характерной для растущего поднятия (купола). Кроме того, поднятие характеризуется положительной формой в рельефе поверхности Земли. Оба этих факта свидетельствуют о современном росте поднятия. Менее уверенно такой же вывод можно сделать и о Березниковском поднятии, в южной части которого также закартирована система радиальных трещинных зон. В этой же части поднятия закартирован Ново-Зырянский активный разлом, в зоне влияния которого в 1999 г. произошел провал дневной поверхности, обусловленный взаимным влиянием разлома и растущего поднятия [24]. Этот вывод хорошо согласуется с отмеченным в районе провала оттоком соли в северном направлении в сторону вершины поднятия и ускоренным по сравнению с расчетным оседанием поверхности Земли [2].

На ВКМКС блоки подсолевого основания движутся преимущественно в горизонтальном направлении. Поскольку расстояние между разломами невелико, то области их динамического влияния перекрываются. Поэтому внутри блоков создаются условия для деструкции геологической среды, в том числе и в надсолевой толще. В этой ситуации на соляную толщу начинают действовать факторы, формирующие соляное поднятие, и происходит постепенное возрастание нагрузки на соль со стороны надсолевой толщи. Благодаря этому происходит отток соли из межкупольного пространства и получает развитие непрерывно-ускоренный процесс роста поднятия. Таков качественно механизм или генезис формирования соляно-купольных структур.

Выводы

Изучение соляной тектоники ВКМКС свидетельствует о том, что закономерности ее формирования и развития в пространстве и во времени происходят в основном под действием тех же факторов, что и в других солеродных бассейнах мира. Образование соляных структур в значительной мере определяется наличием разломов различного ранга и кинематического типа в фундаменте и в подсолевом комплексе; ***постседиментационные тектонические движения*** оказывают существенное влияние на мощность и петрофизические свойства соляной толщи вообще и калийной в частности; формирование соляных валов, прогибов и поднятий происходило и происходит в условиях действия локальных напряжений и дифференциальных тектонических движений для ВКМКС главным образом в виде горизонтальных сдвигов.

Проблема генезиса соляных структур ВКМКС пока рассмотрена не во всей ее полноте и многогранности. Дана лишь качественная сторона этой проблемы как основа для ее количественного описания в будущем и для разработки физико-геологических моделей процессов формирования соляных структур различного генезиса и масштаба.

Для выявления небольших по размерам соляных структур (в отличие от валов и куполов) необходимо выполнять детальные геолого-геофизические исследования. Пример – подземные сейсмоакустические исследованияв юго-западной части Быгельско-Троицкого участка: было выявлено два типа структур – коробчатая и антиклинальная, которые образовались за счет продольного укорочения (скольжения) слоистой толщи [25].

В целом же для Соликамской впадины, как и для других солеродных бассейнов мира, основным типом соляной тектоники является гравитационное скольжение [26].

ЛИТЕРАТУРА

1. Филатов В. В., Болотнова Л. А. О подобии и иерархичности тектонических структур // Известия вузов. Горный журнал. 2019. № 1. С. 52–59. http://doi.org/10.21440/0536-1028-2019-1-52-59
2. Кудряшов А. И. Верхнекамское месторождение солей. 2-е изд. М.: Эпсилон Плюс, 2013. 368 с.
3. Кассин Г. Г., Филатов В. В. Красноуфимский разлом: строение и история развития по геофизическим данным // Известия УГГГА. Сер.: Геология и геофизика. 2003. Вып. 18. С. 170–176.
4. Филатов В. В., Болотнова Л. А. Картирование структурно-тектонических объектов Верхнекамского месторождения калийных солей в магнитном поле // Известия вузов. Горный журнал. 2023. № 2. С. 96–106. http://doi.org/10.21440/0536-1028-2023-2-96-106
5. Кассин Г. Г., Маловичко А. К., Новоселицкий В. М. и др. Гравитационная модель земной коры северо-восточной части Волго-Уральской нефтегазоносной провинции // Гравитационная модель коры и верхней мантии Земли. Киев: Наукова думка, 1979. С. 168–175.
6. Кассин Г. Г., Шершнёв К. С. Разломы Среднего Приуралья // Разломы земной коры Урала и методы их изучения. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1983. С. 84–88.
7. Кассин Г. Г., Филатов В. В. Закономерности блоковой делимости земной коры Урала // Геофизические методы поисков и разведки рудных и нерудных месторождений. Свердловск: Изд-во СГИ, 1990. С. 3–8.
8. Филатов В. В., Болотнова Л. А. Природа и динамика Дуринского прогиба // Известия вузов. Горный журнал. 2016. № 4. С. 111–119.

9. Konstantinova S. A., Chernopazov N. N., Gulyev A. A. Estimate of initial stresses in rock mass of the Upper Kama region based on block hierarchical model // Journal of Mining Science. 2001. Vol. 37. No. 5. P. 447–454.
10. Sanfirov I. A., Stepanov Y. I., Fatkin K. B., Gerasimova I. Y., Nikiforova A. I. Shallow geophysical exploration of the Upper Kama potash salt deposit // Journal of Mining Science. 2013. Vol. 49. No. 6. P. 902–907.
11. Shulakov D. Yu., Butyrin P. G., Verkholantsev A. V. Seismological monitoring at the Upper Kama potash deposit: Objectives problem solutions // Gornyi zhurnal. 2018. No. 6. P. 25–29. http://doi.org/10.17580/gzh.2018.06.05
12. Bychkov S., Dolgal A., Simanov A. Interpretation of Gravity Monitoring Data on Geotechnical Impact on the Geological Environment // Pure and Applied Geophysics. 2021. Vol. 178. Issue. 1. P. 107–121. http://doi.org/10.1007/s00024-020-02640-8
13. Копнин В. И. Верхнекамское месторождение калийных, калийно-магниевых и каменных солей и природа их рассолов // Известия вузов. Горный журнал. 1995. № 6. С. 10–43.
14. Петротектонические основы безопасной эксплуатации Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей / под ред. Н. М. Джиноридзе. Соликамск; СПб: ОГУП, 2000. 400 с.
15. Шерман С. И., Борняков С. А., Буддо В. Ю. Области динамического влияния разломов. Новосибирск: Наука, 1983. 112 с.
16. Лобацкая Р. М. Структурная зональность разломов. М.: Недра, 1987. 128 с.
17. Кассин Г. Г., Филатов В. В. Опыт применения гравиметрии для локального сейсмотектонического районирования Верхнекамского месторождения калийных солей // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационного, магнитного и электрического полей: матер. междунар. семинара им. Д. Г. Успенского. Ч. I. Екатеринбург, 2002. С. 150–154.
18. Константинова С. А., Кассин Г. Г., Глебов С. В. О геодинамическом районировании недр и земной поверхности на Верхнекамском месторождении калийных солей // ГИАБ. М., 2001. № 6. С.101–105.
19. Гзовский М. В. Основы тектонофизики. М.: Наука, 1975. 536 с.
20. Сигов А. П. Металлогения мезозоя и кайнозоя Урала. М.: Недра, 1969. 296 с.
21. Плюснин К. П. Тектоника и геохронология горизонтальных дислокаций литосферы. М.: Недра, 1985. 200 с.
22. Больтюков Г. В. Бром в рассолах Верхнекамского соленосного бассейна // Состав и условия образования морских и континентальных галогенных формаций. Новосибирск: Наука, 1991. С. 59–64.
23. Конищев В. С. Тектоника областей галокинеза Восточно-Европейской и Сибирской платформ. Минск: Наука и техника, 1982. 257 с.
24. Filatov V. V., Bolotnova L. A. Generalizing the experience of forecasting dynamic events at the Upper Kama potassium salt deposit according to geological and geophysical data // Известия вузов. Горный журнал. 2019. № 4. С. 61–70. https://doi.org/10.21440/0536-1028-2019-4-61-70
25. Чайковский И. И. О складчато-блоковом строении соляных и надсоляных отложений Соликамской впадины по материалам наземной и подземной сейсмоакустики // Горное эхо. 2021. № 2(83). С. 11–14. https://doi.org/10.7242/echo.2021.2.3
26. Чайковский И. И. Типизация основных механизмов соляной тектоники мира: Верхнекамское месторождение как эталон многоэтапного гравитационного скольжения // Вестник Пермского научного центра. 2013. № 1. С. 18–37.

Статья поступила в редакцию 20 октября 2023 года

UDC 551.24

http://doi.org/10.21440/2307-2091-2024-1-59-66

On the genesis of salt structures of the Verkhnekamsk potash salt deposit

Vladimir Viktorovich FILATOV[1*]
Lyubov'Anatol'evna BOLOTNOVA[2**]

[1]Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, Vladimir, Russia
[2]Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia

Abstract

Relevance. One of the most important tasks of geological research is the task of establishing the genesis of any geological formation, in particular, the genesis of geological structures, since deposits of various minerals are not only spatially, but also genetically related to the latter. To solve this problem, it is necessary to answer at least two questions: what is the driving force of the process that contributed to the formation of the geological structure in question and what are the conditions under which the structure was formed. To answer these questions, it is necessary to have an idea about the petrophysical properties of the geological environment, about the thermodynamic conditions of structure formation, about the regional geotectonic environment, about the mechanisms of deformation of the geological environment, about structural paragenesis, i. e. about the totality of tectonic elements arising during structure formation and about its polychronicity or the temporary "sweep" of the paleotectonic environment of structure formation.
Purpose of the study. It consists in determining the genesis of the main salt structures of the Verkhnekamsk potash deposit: salt shafts, deflections and salt elevations or domes.
Methods of research. The solution of the problem of determining the genesis of salt structures was carried out through a comprehensive qualitative and quantitative analysis of the data of geological and geophysical methods performed on the territory of the Verkhnekamskoye potash salt deposit, and above all, the results of detailed areal and high-precision gravimetric and aeromagnetic surveys of the scale: 1 : 25 000 and 1 : 10 000 and larger.
Research results. As a result of the studies carried out, it was shown that in the conditions of the Verkhnekamskoye potash salt deposit, the main factor in the formation of salt structures are the post-sedimentation movements of blocks that occurred and are occurring in the subsalt column.

Keywords: Verkhnekamskoye potash salt deposit, genesis of salt structures, geological and geophysical data.

REFERENCES

1. Filatov V. V., Bolotnova L. A. 2019, On the similarity and hierarchy of tectonic structures. *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal* [News of Universities. Mining Journal], no. 1, pp. 52–59. (*In Russ.*) http://doi.org/10.21440/0536-1028-2019-1-52-59
2. Kudryashov A. I. 2013, Verkhnekamskoe salt deposit. Moscow, 368 p. (*In Russ.*)
3. Kassin G. G., Filatov V. V. 2003, Krasnoufimsky fault: structure and history of development according to geophysical data. *Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta* [News of the Ural State Mining University], issue 18, pp. 170–176. (*In Russ.*)
4. Filatov V. V., Bolotnova L. A. 2023, Mapping of structural-tectonic objects of the Verkhnekamsk potassium salt deposit in a magnetic field. *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal* [News of Universities. Mining Journal], no. 2, pp. 96–106. (*In Russ.*) http://doi.org/10.21440/0536-1028-2023-2-96-106
5. Kassin G. G., Malovichko A. K., Novoselitsky V. M. 1979, Gravity model of the earth's crust of the northeastern part of the Volga-Ural oil and gas province. Gravity model of the Earth's crust and upper mantle, Kiev, pp. 168–175. (*In Russ.*)
6. Kassin G. G., Shershnev K. S. 1983, Faults of the Middle Urals. Faults in the crust of the Urals and methods for studying them, Sverdlovsk, pp. 84–88. (*In Russ.*)
7. Kassin G. G., Filatov V. V. 1990, Patterns of block divisibility of the earth's crust of the Urals. Geophysical methods of prospecting and exploration of ore and non-metallic deposits, Sverdlovsk, pp. 3–8. (*In Russ.*)
8. Filatov V. V., Bolotnova L. A. 2016, Nature and dynamics of the Durinsky trough. *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal* [News of Universities. Mining Journal], no. 4, pp. 111–119. (*In Russ.*)
9. Konstantinova S. A., Chernopazov N. N., Gulyev A. A. 2001, Estimate of initial stresses in rock mass of the Upper Kama region based on block hierarchical model. *Journal of Mining Science*, vol. 37, no. 5, pp. 447–454.
10. Sanfirov I. A., Stepanov Y. I., Fatkin K. B., Gerasimova I. Y., Nikiforova A. I. 2013, Shallow geophysical exploration of the Upper Kama potash salt deposit. *Journal of Mining Science*, vol. 49, no. 6, pp. 902–907.
11. Shulakov D. Yu., Butyrin P. G., Verkholantsev A. V. 2018, Seismological monitoring at the Upper Kama potash deposit: Objectives problem solutions. *Gornyi zhurnal*, no. 6, pp. 25–29. http://doi.org/10.17580/gzh.2018.06.05
12. Bychkov S., Dolgal A., Simanov A. 2021, Interpretation of Gravity Monitoring Data on Geotechnical Impact on the Geological Environment. *Pure and Applied Geophysics*, vol. 178, issue 1, pp. 107–121. http://doi.org/10.1007/s00024-020-02640-8
13. Kopnin V. I. 1995, Verkhnekamskoe deposit of potassium, potassium-magnesium and rock salts and the nature of their brines. *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal* [News of Universities. Mining Journal], no. 6, pp. 10–43. (*In Russ.*)
14. Dzhinoridze N. M. 2000, Petrotectonic principles of safe exploitation of the Verkhnekamskoye deposit of potassium-magnesium salts. Solikamsk; St. Petersburg, 400 p. (*In Russ.*)

✉filatov47@bk.ru
**Lyubov.Bolotnova@m.ursmu.ru

15. Sherman S. I., Bornyakov S. A., Buddo V. Yu. 1983, Areas of dynamic influence of faults. Novosibirsk, 112 p. (*In Russ*.)
16. Lobatskaya R. M. 1987, Structural zoning of faults. Moscow, 128 p. (*In Russ*.)
17. Kassin G. G., Filatov V. V. 2002, Experience in using gravimetry for local seismotectonic zoning of the Verkhnekamsk potassium salt deposit. Issues of theory and practice of geological interpretation of gravitational, magnetic and electric fields. Ekaterinburg, pp. 150–154. (*In Russ*.)
18. Konstantinova S. A., Kassin G. G., Glebov S. V. 2001, On the geodynamic zoning of the subsoil and the earth's surface at the Verkhnekamsk potassium salt deposit. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mining information and analytical bulletin]. Moscow, no. 6, pp. 101–105. (*In Russ*.)
19. Gzovsky M. V. 1975, Fundamentals of tectonophysics. Moscow, 536 p. (*In Russ*.)
20. Sigov A. P. 1969, Metallogeny of the Mesozoic and Cenozoic Urals. Moscow, 296 p. (*In Russ*.)
21. Plyusnin K. P. 1985, Tectonics and geochronology of horizontal dislocations of the lithosphere. Moscow, 200 p. (*In Russ*.)
22. Boltyukov G. V. 1991, Bromine in brines of the Verkhnekamsk salt-bearing basin. Composition and conditions of formation of marine and continental halogen formations. Novosibirsk, pp. 59–64. (*In Russ*.)
23. Konishchev V. S. 1982, Tectonics of the halokinesis areas of the East European and Siberian platforms. Minsk, 257 p. (*In Russ*.)
24. Filatov V. V., Bolotnova L. A. 2019, Generalizing the experience of forecasting dynamic events at the Upper Kama potassium salt deposit according to geological and geophysical data. *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal* [News of Universities. Mining Journal], no. 4, pp. 61–70. https://doi.org/10.21440/0536-1028-2019-4-61-70
25. Tchaikovsky I. I. 2021, On the folded-block structure of salt and supra-salt deposits of the Solikamsk depression based on materials from above-ground and underground seismoacoustics. *Gornoye echo* [Mountain Echo], no. 2 (83), pp. 11–14. (*In Russ*.) https://doi.org/10.7242/echo.2021.2.3
26. Tchaikovsky I. I. 2013, Typification of the main mechanisms of salt tectonics of the world: Verkhnekamskoye deposit as a standard of multi-stage gravitational sliding. *Vestnik Permskogo nauchnogo tsentra* [Bulletin of the Perm Scientific Center], no. 1, pp. 18–37. (*In Russ*.)

The article was received on October 20, 2023

УДК 553.87+661.11 http://doi.org/10.21440/2307-2091-2024-1-67-74

Критерии оценки сырьевой базы промышленного производства высокочистого кварца на основе анализа кварца Кыштымского месторождения и других действующих мировых производителей

Леонид Вадимович КУЗЬМИН[1*]
Вадим Георгиевич КУЗЬМИН
Юрий Алексеевич ПОЛЕНОВ[2**]

[1]АО «Кыштымский ГОК», Челябинская область, Россия
[2]Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия

Аннотация

Актуальность. Высокочистый кварц (ВЧК) является одним из важных материалов для высокотехнологичной промышленности. Несмотря на широкую распространенность месторождений кварца, лишь немногие из них могут быть использованы для производства ВЧК. Используемые запасы такого кварца в России имеют ограниченные объемы, в связи с чем актуальным является вопрос поиска и вовлечения новых объектов в качестве стабильной основы для производства ВЧК, в том числе из ранее разведанных месторождений

Целью работы является определение критериев оценки кварцевых месторождений в качестве потенциальной сырьевой базы для производства ВЧК на основе анализа данных сырьевой базы действующих производителей ВЧК (Русский кварц, Sibelco, The Quartz Corp.), а также компаний, выпускающих данную продукцию ранее.

Методология. Проведен анализ свойств кварца из месторождений ведущих мировых производителей ВЧК, даны общие генетические и экономические характеристики таких месторождений. Использованы методы сравнения, аналогий, логический анализ, метод экспертных оценок. В качестве оценки качественных характеристик кварца использованы химико-спектральный анализ (ICP-OES), измерение коэффициента светопропускания, ситовой гранулометрический анализ.

Результаты. Определены шесть основных критериев оценки кварцевого сырья и их значения для оценки месторождений кварца в качестве сырьевой базы промышленного производства ВЧК.

Выводы. Матрица критериев, представленная в данной работе, позволяет быстро и с минимальными затратами проводить экспресс-оценку кварцевых месторождений в качестве потенциальной сырьевой базы для производства ВЧК. Такая матрица может быть использована не только при оценке новых объектов, но и для ревизии отчетов по ранее разведанным месторождениям с учетом современных требований промышленности.

***Ключевые слова*:** высокочистый кварц, ВЧК, оценка, критерии качества, месторождение, производители, высокотехнологичная промышленность, сырьевая база, Кыштымское месторождение, HPQ, Sibelco, The Quartz Corp, hi-tech.

Введение

Широко используемый термин «высокочистый кварц (ВЧК)», описывающий продукт, получаемый из кварцевой руды, определяется не только генетическими или минералогическими свойствами кварцевого сырья, но и целым комплексом параметров: применимость в различных отраслях промышленности, технико-экономические параметры месторождений, используемых для производства ВЧК, производственный цикл, технологические возможности обогащения кварцевой руды и др. Эти параметры для ВЧК отличаются изменчивостью во времени, в связи с чем применимость термина «высокочистый кварц» периодически претерпевает изменения.

Учитывая сказанное, потенциальную сырьевую базу для производства ВЧК необходимо рассматривать в разрезе генетических, минералогических, технологических и коммерческих критериев.

Поскольку само производство ВЧК требует значительных капитальных вложений и имеет длительный цикл возврата инвестиций, определение правильного источника сырья среди широчайшего ряда кварцевых месторождений имеет критически важное значение. Цена ошибки и неправильного выбора на стадии организации выпуска ВЧК очень велика, что создает необходимость создания матрицы оценки кварцевого сырья, позволяющей быстро и с невысокими затратами предварительно определить вероятность использования того или иного кварцевого объекта для производства ВЧК.

✉kgok@yandex.ru
**fgg.gl@m.ursmu.ru

На основании многолетнего опыта АО «Кыштымский ГОК» (начиная с 1966 г.) по освоению Кыштымского месторождения гранулированного кварца, а также анализа данных по другим мировым производителям ВЧК, выделяются следующие критерии при предварительной оценке технологической пригодности объектов сырьевой базы для производства ВЧК.

1. Генетические критерии

1.1. Тип кварцевого сырья

В СССР, а позднее и в России, приоритетным типом кварцевого сырья для производства ВЧК традиционно является жильный кварц. Проведенные значительные работы по поиску, опробованию и промышленной эксплуатации кварцевых жил позволили накопить большой объем данных по различным объектам. Мировой опыт показывает, что помимо жильного кварца в производство ВЧК также может быть вовлечен кварц месторождений иного генезиса. К подобным месторождениям относятся разновидности аляскитовых гранитов и пегматитов [1].

Такая оценка подтверждается тем, что все промышленные поставщики, как действующие на момент написания данной статьи, так и поставлявшие ВЧК в последние 15 лет, опирались на следующие типы сырья:

– аляскитовые граниты (Sibelco, бывш. UNIMIN);

– пегматиты (Sibelco, The Quartz Corp, Norwegian Crystallites AS);

– жильный кварц (ООО «Русский кварц», АО «Полярный кварц», АО «Кыштымский ГОК», ПО Уралкварцсамоцветы).

Другие типы кварцевого сырья (кварцевые пески, кварциты и др.) по совокупности признаков в большей степени считаются технологически или экономически малопригодными для производства ВЧК. В частности, кварц в кварцитах, несмотря на достаточно высокую исходную химическую чистоту и содержание в рудной массе более 98 %, часто имеет относительно мелкозернистую гранулометрию и находится в тесных сростках с другими породообразующими минералами [1], в том числе с большим количеством включений внутри зерен, что не позволяет современным методам промышленного обогащения эффективно достигать необходимого качества. Горный хрусталь, ранее являвшийся одним из основных типов сырья для производства ВЧК, на сегодняшний день также не рассматривается для промышленного использования [1].

Необходимо отметить также, что пригодность кварцевой руды для производства высокочистых кварцевых концентратов далеко не всегда определяется минимальным содержанием сопутствующих минералов в массе руды, т. е. чем более мономинеральна кварцевая руда, тем больше вероятность того, что кварц пригоден для производства ВЧК. С этим, в частности, связано большое количество негативных попыток тестирования объектов молочно-белого жильного кварца, порой отличающегося крайне низким содержанием минеральных примесей (содержание кварца на уровне 99 % в жильной массе), а также высокой химической чистотой. Практика показывает, что мономинеральность рудной массы не может служить основным критерием оценки в случае сырьевой базы ВЧК. Например, в руде месторождения Spruce Pine (месторождение, на котором базируются компании Sibelco (США) и The Quartz Corp (США)), минерализация достигает 75 % [2–4], т. е. содержание полезного компонента существенно меньше содержания минеральных примесей.

Решающую роль в пригодности кварцевого сырья для производства ВЧК играет не столько качество рудной массы в целом, сколько параметры качества и однородность свойств слагающих ее кварцевых зерен.

2. Минералогические и технологические критерии

2.1. Параметры качества кварца (примеси различного характера в слагающих зернах кварца и в самой кварцевой руде)

Примеси в природном кварце и кварцевой руде, определяющие качество кварца и его применимость в качестве ВЧК, с технологической точки зрения можно разделить на следующие виды [5, 6]:

Газово-жидкие включения (ГЖВ). Наличие ГЖВ в кварце определяется захватом флюидов в процессе роста зерен кварца (первичные включения), а также при залечивании трещин в уже существующих зернах минерализованными растворами (вторичные включения) [1, 5]. Содержание газово-жидких включений, прежде всего, определяет качество получаемого из ВЧК кварцевого стекла в части таких дефектов, как наличие пузырей, кластеров пузырей, капилляров и др., и является таким же важнейшим параметром, как и химическая чистота кварца. Степень поражения кварцевого сырья газово-жидкими включениями может служить для выделения двух его принципиально различных типов: молочно-белого и прозрачного [5]. Экономически обоснованных обогатительных операций, позволяющих получить прозрачное кварцевое стекло из молочно-белого кварцевого сырья, в настоящее время не существует [6].

Структурные примеси и минеральные микропримеси в зернах кварца. Структурные примеси – это элементы-примеси, внедренные в кристаллическую решетку природного кварца. В основном такими элементами являются Li^{+}, Na^{+}, K^{+}, Al^{3+}, Ti^{4+}, Fe^{3+}, Fe^{2+}, B^{3+}, P^{5+} а также H в форме OH^{-} и молекулярной воды [4].

Минеральные микропримеси в зернах кварца – это включения сторонних минералов размером менее 1 мкм [6], захваченных либо сформировавшихся внутри зерен в процессе роста и последующей перекристаллизации. Минеральный состав таких включений весьма многообразен и, как правило, зависит от состава вмещающих пород и условий формирования кварцевого месторождения.

Минеральные примеси макроуровня, входящие в состав кварцевой руды. Эту группу примесей определяют минеральные включения, слагающие кварцевую рудную массу наряду с кварцем. Они представлены отдельными зернами и сростками сторонних минералов, сростками с зернами кварца, пленками и примазками на поверхности кварцевых зерен, фрагментами вмещающих пород, в том числе захваченных во время формирования кварцевых тел и пр. Главная отличительная черта минеральных примесей – то, что они могут быть отделены от зерен кварца путем применения стандартных процессов обогащения. Так же, как минеральные микропримеси, примеси макроуровня могут иметь разнообразный состав и зависят от состава вмещающих пород [5].

Поскольку газово-жидкие включения, структурные примеси и минеральные микропримеси практически невозможно удалить без полного разрушения кварцевого зерна, их содержание в кварце служит критерием пределов обогатимости кварцевого сырья и, соответственно, возможности применения в производстве ВЧК. Содержание ГЖВ определяет уровень дефектов в получаемом из ВЧК кварцевом стекле в виде пузырей и капилляров, а структурные примеси – предельно достижимую химическую чистоту ВЧК.

Минеральные примеси макроуровня могут быть удалены с помощью современных методов обогащения практически полностью. Их количество и состав определяют оптимальную технологическую схему обогащения кварцевого сырья.

В практике для характеристики чистоты собственно кварца используют термин «монофракция». Под монофракцией понимаются тщательно отобранные кварцевые индивиды с очищенной поверхностью. Гранулометрический состав монофракции должен соответствовать крупности исходного сырья, подготовленного для обогащения. Получение кварцевых концентратов более высокого качества, чем монофракция, традиционными методами обогащения не представляется возможным [6] (за исключением применения метода горячего хлорирования). Дефакто выделение монофракции представляет собой моделирование максимально обогащенного материала, полностью освобожденного от минеральных макропримесей.

Анализ содержания ГЖВ и химического состава монофракции позволяет сделать вывод о пригодности кварца для производства ВЧК с очень высокой степенью достоверности и исключить технологические факторы, влияющие на качество ВЧК.

Содержание газово-жидких включений. В отечественной практике для измерения содержания ГЖВ используется метод измерения коэффициента светопропускания (Т, %) зерен кварца в иммерсионной жидкости (Методика ГосНИИКС ТУ 21-РСФСР-790-80). Коэффициент светопропускания кварца, используемого для производства ВЧК, должен быть не менее 80 % [7]. Для примера, коэффициент светопропускания кварца используемых кварцевых объектов из месторождений Spruce Pine и жилы № 175 Кыштымского месторождения, находится в диапазоне 84–86 % (табл. 1).

Необходимо отметить, что основная масса ГЖВ в некоторых типах сырья, например в гранулированном жильном кварце, локализована в межзерновом пространстве и вдоль внутригранулярных трещин [5, 8], легко вскрывается и удаляется при обогащении. Частично ГЖВ, локализованные в зернах кварца, могут также вскрываться при процессах прокаливания, однако эффективность таких операций незначительна.

Химический состав. Химический состав монофракции в основном определяется содержанием структурных примесей и микропримесей. Влияние ГЖВ на химический состав при светопропускании более 80 % незначителен в связи с очень малым количеством таких включений.

В зависимости от направления применения потребители предъявляют различные требования к химической чистоте ВЧК, но в целом текущие стандарты качества говорят о том, что общее содержание нормируемых элементов-примесей не должно превышать 20 г/т. При этом некоторые отрасли лимитируют содержание отдельных элементов в очень ограниченных пределах – например, содержание железа в ВЧК, используемых в фотовольтаике, не должно превышать 0,5 г/т, а содержание бора и фосфора – не более 0,1 г/т. Для полупроводниковой промышленности – содержание железа должно быть не более 0,2 г/т, а содержание меди, хрома, марганца и никеля для наиболее критичных приложений в полупроводниковой промышленности должно быть менее 0,005 г/т по каждому из этих элементов.

Ранее чистота монофракций и промышленных сортов ВЧК весьма отличалась в связи с несовершенством технологии обогащения. Визуальный анализ наиболее очищенных сортов ВЧК в настоящее время показывает практически полное отсутствие минеральных примесей макроуровня, что говорит о достижении максимального уровня очистки от макропримесей существующими технологическими решениями и равенстве качества между такими концентратами и монофракциями. При этом общая химическая чистота ВЧК достигла того же уровня, что у искусственных кристаллов кварца (ИКК), выращенных гидротермальным методом, и есть основания полагать, что уровень содержания суммы примесей 7–8 г/т является предельным для ВЧК, поскольку о промышленных месторождениях с более чистым кварцем для ВЧК на сегодняшний день неизвестно.

Химический состав и сумма примесей в наиболее очищенных сортах ВЧК различного генезиса, произведенных ведущими производителями в 2023 г. (без приме-

Таблица 1. Результаты замеров светопропускания в образцах различных сортов ВЧК из месторождения Spruce Pine и жилы № 175 Кыштымского месторождения

Table 1. Results of light transmission measurements in samples of various grades of HPQ from the Spruce Pine deposit and vein no. 175 of the Kyshtym deposit

Месторождение	Тип сырья	Производитель	Сорт	Светопропускание Т, %
Spruce Pine	Пегматиты	The Quartz Corp	NC4A	84,5
Spruce Pine	Аляскитовые граниты	Sibelco	IOTA 8	84,8
Жила № 175 Кыштымского месторождения	Жильный кварц	Кыштымский ГОК	RQ-2K	85,1

Таблица 2. Химический состав максимально обогащенного ВЧК (не прошедшего горячее хлорирование) ведущих мировых производителей и искусственных кристаллов кварца производства АО «Южноуральский завод «Кристалл», г. Южноуральск, г/т
Table 2. Chemical composition of the most enriched HPQ (not subjected to hot chlorination) from the world's leading manufacturers and artificial quartz crystals produced by AO Yuzhnouralsk Plant Kristall, Yuzhnouralsk, ppm

Элемент	Производитель/тип сырья/сорт			
	Sibelco [9]	Русский кварц [10]	The Quartz Corp [11]	Завод Кристалл [12]
	Аляскитовые граниты	Жильный кварц	Пегматиты	ИКК
	IOTA 4	RQ-2K	NC4A	Химически чистый кварц
Al	8	3,9	13	< 5,0
B	< 0,05	0,07	< 0,1	
Ca	0,7	0,12	0,5	< 0,6
Cr	0,007	< 0,01	< 0,01	< 0,1
Cu	0,004	< 0,010	< 0,01	< 0,1
Fe	0,3	0,2	0,2	< 0,5
K	0,4	0,13	0,5	< 0,5
Li	0,2	0,3	0,4	< 2,0
Mg	0,07	0,05	< 0,1	< 0,1
Mn	0,013	0,004	< 0,1	< 0,1
Na	1,0	0,3	0,8	< 2,5
Ni	0,002	< 0,01	< 0,01	< 0,1
Ti	1,4	2,9	1,2	< 0,4
Сумма примесей	**< 12,1**	**< 8,0**	**< 16,9**	**< 12,0**

Таблица 3. Размер слагающих зерен в месторождениях, используемых производителями ВЧК
Table 3. Sizes of constituent grains in deposits used by HPQ producers

Месторождение	Производитель	Тип сырья	Размер слагающих зерен
Spruce Pine	Sibelco, The Quartz Corp	Пегматиты	Средний размер > 1,25 мм [3]
Spruce Pine	Sibelco	Аляскитовые граниты	Средний размер 1,25 мм [3]
Жила № 175 Кыштымского месторождения	Кыштымский ГОК	Жильный кварц	Средний размер зерен 1,2 мм; 20–35 % зерен размером 2–5 мм, до 60–80 % – 0,1–0,4 мм [13]
Nedre Oyvollen	Norwegian Crystallites AS	Пегматиты	Средний размер 6 мм [1]

нения метода горячего хлорирования), и искусственных кристаллов кварца производства АО «Южноуральский завод «Кристалл» приведен в табл. 2.

2.2. Размер зерен кварца в рудной массе

Помимо собственно химической чистоты и отсутствия ГЖВ необходимо принимать во внимание размер кварцевого зерна. Стандартный гранулометрический состав ВЧК на текущий момент определяется основной фракцией +75–300 мкм. Средний размер слагающих зерен не должен быть существенно меньше 200 мкм. В противном случае после механической дезинтеграции в концентрате будут присутствовать конгломераты из нескольких «нераскрытых» зерен, что существенно повышает вероятность присутствия минеральных примесей в межзерновом пространстве таких конгломератов, которые не удаляются в последующих процессах обогащения и ведут к потере качества ВЧК. Информация по размеру кварцевых зерен в известных месторождениях ВЧК приведена в табл. 3.

3. Коммерческие критерии

3.1. Однородность (гомогенность) кварца и кварцевой руды

Однородность параметров качества кварца (прежде всего параметров химического состава, содержания газово-жидких включений и гранулометрии) во всем объеме отрабатываемого объекта являются одним из важных критериев при рассмотрении месторождения в качестве сырьевой базы производства ВЧК. Это обуславливается запросом потребителей, связанным с нежелательностью отклонений в параметрах качества поставляемых ВЧК.

Тестирование нового кварцевого сырья и согласование спецификаций химического состава связаны с длительными и дорогостоящими процедурами сертификации (в полупроводниковой промышленности период сертификации может достигать трех лет). При этом, согласно стандартам управления качеством, до окончания сертификации использовать ВЧК невозможно, что может привести к перерыву или полному сокращению поставок.

Таблица 4. Запасы месторождений кварцевого сырья, используемых для промышленного выпуска ВЧК, тыс. т
Table 4. Reserves of deposits of quartz raw materials used for industrial production of HPQ, thousand tons

Наименование	Производитель		
	Sibelco	The Quartz Corp	Norwegian Crystallites AS
Месторождение	Spruce Pine	Spruce Pine	Nedre Oyvollen
Запасы, тыс. т	> 10 000 [10]	> 10 000 [10]	> 170 [1]

Таблица 5. Матрица критериев и их значений для предварительной оценки сырьевой базы в качестве потенциального источника ВЧК
Table 5. Matrix of criteria and their values for the preliminary assessment of the raw material base as a potential source of HPQ

Критерий	Значение
Тип кварцевого сырья	Жильный кварц, пегматиты, аляскитовые граниты
Светопропускание монофракции Т, %	> 80
Сумма элементов-примесей в монофракции, г/т	< 20
Средний размер зерна, мкм	Не менее 200
Гомогенность параметров качества кварца в объекте отработки (светопропускание, химический состав, гранулометрия)	Да
Подтвержденные запасы кварца в объекте отработки, тыс. т	Не менее 80

Содержание ГЖВ, структурных примесей и микропримесей в природном кварце даже в пределах одного объекта промышленной добычи может очень существенно различаться. Еще более существенно такие колебания свойств кварца проявляются при сравнении различных объектов в пределах одного месторождения. Такая изменчивость напрямую влияет на плавочные свойства ВЧК и качество изготавливаемого кварцевого стекла и требует проводить тестирование для каждого нового объекта и постоянный мониторинг свойств уже эксплуатируемых.

Разнородность содержания и компонентного состава минеральных макропримесей в кварцевой рудной массе имеет меньшую значимость, однако этот фактор также играет свою роль, поскольку требует поиска и постоянного изменения технологических схем обогащения, что играет негативную роль как с экономической точки зрения, так и с точки зрения постоянства качества.

Учитывая сказанное, нельзя рассматривать совокупность кварцевых жил в месторождении как единую сырьевую базу. В целях производства ВЧК каждая кварцевая жила должна оцениваться как отдельный объект.

3.2. Подтвержденные извлекаемые запасы кварца

Согласно ряду источников, экономически обоснованной является отработка месторождения ВЧК с извлекаемыми запасами более 80 тыс. т [1, 14].

В целом эти данные подтверждаются данными по ведущим производителям ВЧК (табл. 4), однако необходимо учитывать, что при рассмотрении данного критерия имеет значение большое количество технико-экономических параметров, начиная от размера инвестиционных вложений и объемов горных работ при разработке кварцевого тела и заканчивая текущим уровнем цен.

Кроме того, с учетом объемов капитальных затрат, длительности инвестиционного цикла, а также длительности тестирования и сертификации ВЧК запасы месторождения должны обеспечивать работу предприятия на срок не менее 15–25 лет в зависимости от интенсивности добычи и объемов переработки.

4. Матрица критериев предварительной оценки месторождений ВЧК

Приведенный анализ характеристик месторождений ВЧК позволяет сформировать матрицу критериев для предварительной оценки потенциальной пригодности кварцевых месторождений для производства ВЧК (табл. 5).

Необходимо отметить, что данная матрица предлагается только для предварительной оценки. При детальном рассмотрении и с течением времени значения данных критериев могут изменяться в зависимости от конкретных месторождений ВЧК, причем как в сторону ужесточения, так и в сторону расширения. Так, технико-экономические условия (цена и степень обогащения ВЧК, горнотехнические условия добычи и др.) влияют на минимально необходимый объем подтвержденных запасов ВЧК. В будущем возможно появление новых промышленных типов сырья, например определенных разновидностей кварцитов [15], а постоянно ужесточающиеся требования высокотехнологичной промышленности могут существенно сократить сферы применения кварца из определенных месторождений. В качестве примера можно привести месторождение Nedre Oyvollen (Норвегия), базовый источник сырья для компании Norwegian Crystallites AS. После того как требования к химической чистоте ВЧК изменились с «менее чем 50 г/т» в начале 2000-х гг. до «менее чем 20 г/т» в 2010-х гг., кварц Nedre Oyvollen (с общим содержанием примесей более 35 г/т) был фактически вытеснен с рынка ВЧК, оставаясь только в узком применении в качестве наполнителей ЕМС, а компания Norwegian Crystallites AS ушла с рынка, будучи поглощенной компаниями Norsk Mineral (Норвегия) и Imerys (Франция) [16].

Заключение

Применение матрицы критериев предварительной оценки месторождений ВЧК на основании имеющихся отчетов по ранее разведанным месторождениям кварца дает возможность произвести выборку потенциальных кварцевых объектов для производства ВЧК согласно современным требованиям промышленности и с минимальными временными и денежными затратами (а в случае необходимости – с минимальным дополнительным опробованием уже известных объектов). Расширяется также перечень новых источников ВЧК за счет других генетических типов сырья, ранее не рассматривавшихся в нашей стране для этой цели, но успешно использующихся за рубежом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Quartz: Deposits, Mineralogy and Analytics. Ed. by J. Götze, R. Möckel. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2012. 360 p. https://doi.org/10.1007/978-3-642-22161-3
2. Swanson S. E., Veal W. B. Mineralogy and petrogenesis of pegmatites in the Spruce Pine District, North Carolina, USA // Journal of Geosciences. 2010. Vol. 55. Issue 1. P. 27–42. https://doi.org/10.3190/jgeosci.062
3. Brobst D. A. Geology of the Spruce Pine District, Avery, Mitchell, and Yancey Counties North Carolina // Geological Survey Bulletin. 1962. No. 1122-A. https://doi.org/10.3133/b1122A
4. Крылова Г. И., Скобель Л. С., Митрофанов А. А., Балакирев В. Г. Геологические и минералого-геохимические сведения о кварце с торговой маркой IOTA (США, штат Северная Каролина). Возможности поиска его аналогов в России // Уральский геологический журнал. 2003. № 4 (34). С. 81–122.
5. Минералургия жильного кварца / под ред. В. Г. Кузьмина, Б. Н. Кравца. М.: Недра, 1990. 294 с.
6. Кузьмина Н. И. Критерии определения пределов обогатимости различных природных типов кварцевого сырья // Разведка и охрана недр. 2007. № 10. С. 49–51.
7. Огородников В. Н., Поленов Ю. А., Недосекова И. Л., Савичев А. Н. Гранитные пегматиты, карбонатиты и гидротермалиты Уфалейского метаморфического комплекса. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН; УГГУ, 2016. 283 с.
8. Поленов Ю. А. Эндогенные кварцево-жильные образования Урала. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2008. 269 с.
9. Sibelco. High Purity Quartz. URL: https://www.sibelco.com/materials/high-purity-quartz
10. The Quartz Corp. High Purity Quartz. URL: https://thequartzcorp.com/quartz/
11. Русский кварц. Продукция. URL: https://russianquartz.com/produktsiya/
12. Южноуральский завод «Кристалл». Продукция. URL: http://www.kristallplant.com/produkciya
13. Огородников В. Н., Поленов Ю. А., Савичев А. Н. Особо чистый кварц Уфалейского кварценосного района (Южный Урал) // Известия УГГУ. 2018. Вып. 1(49). С. 23–32. https://doi.org/10.21440/2307-2091-2018-1-23-32
14. Бурьян Ю. И., Борисов Л. А., Красильников П. А. Кварцевое сырье – важнейший вид минеральных ресурсов для высокотехнологичных отраслей промышленности // Разведка и охрана недр. 2007. № 10. С. 9–12. EDN: https://elibrary.ru/kdrzib
15. Жабоедов А. П., Непомнящих А. И., Соломеин О. Н. Разработка технологии получения кварцевого концентрата из кварцитов Восточного Саяна // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2016. Т. 6. № 4. С. 92–99. https://doi.org/10.21285/2227-2925-2016-6-4-92-99
16. Norsk Mineral. URL: https://www.nomin.no/our-history/-article318-270.html

Статья поступила в редакцию 12 октября 2023 года

UDC 553.87+661.11 http://doi.org/10.21440/2307-2091-2024-1-67-74

Criteria for assessing the raw material base for the industrial production of high-purity quartz based on an analysis of quartz from the Kyshtym deposit and other existing global producers

Leonid Vadimovich KUZ'MIN[1*]
Vadim Georgievich KUZ'MIN
Yuriy Alekseevich POLENOV[2**]

[1]JSC "Kyshtymskiy GOK", Chelyabinsk region, Russia
[2]Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia

Abstract

Relevance. High-purity quartz (HPQ) is one of the important materials for the high-tech industry. Despite the widespread occurrence of quartz deposits, only a few of them can be used for the production of HPQ. The used reserves of such quartz in Russia have limited volumes, and therefore the issue of searching and involving new objects as a stable basis for the production of HPQ, including from among previously explored deposits, is relevant.

The purpose of the work is to determine the criteria for assessing quartz deposits as a potential raw material base for the production of HPQ based on the analysis of data from the raw material base of existing producers of HPQ (Russian Quartz, Sibelco, The Quartz Corp.), as well as companies that previously produced these products.

Methodology. An analysis of the properties of quartz from deposits of the world's leading producers of HPQ quartz has been carried out, and general genetic and economic characteristics of such deposits have been given. Methods of comparison, analogies, logical analysis, and the method of expert assessments were used. To assess the quality characteristics of quartz, chemical spectral analysis (ICP-OES), measurement of light transmittance, and sieve granulometric analysis were used.

Results. Six main criteria for assessing quartz raw materials and their significance for assessing quartz deposits as a raw material base for the industrial production of HPQ are identified.

Conclusions. The matrix of criteria presented in this work makes it possible to quickly and at minimal cost carry out a rapid assessment of quartz deposits as a potential raw material base for the production of HPQ. Such a matrix can be used not only when assessing new objects, but also to revise reports on previously explored deposits, taking into account modern industry requirements.

***Keywords*:** high-purity quartz, assessment, quality criteria, deposit, manufacturers, high-tech industry, raw material base, Kyshtymskoye deposit, HPQ, Sibelco, The Quartz Corp, hi-tech.

REFERENCES

1. Götze J., Möckel R. 2012, Quartz: Deposits, Mineralogy and Analytics. Berlin; Heidelberg, 360 p. https://doi.org/10.1007/978-3-642-22161-3
2. Swanson S. E., Veal W. B. 2010, Mineralogy and petrogenesis of pegmatites in the Spruce Pine District, North Carolina, USA. *Journal of Geosciences*, vol. 55, issue 1, pp. 27–42. https://doi.org/10.3190/jgeosci.062
3. Brobst D. A. 1962, Geology of the Spruce Pine District, Avery, Mitchell, and Yancey Counties North Carolina. *Geological Survey Bulletin*, no. 1122-A. https://doi.org/10.3133/b1122A
4. Krylova G. I., Skobel L. S., Mitrofanov A. A., Balakirev V. G. 2003, Geological and mineralogical-geochemical information about quartz with the IOTA trademark. Possibility of searching for its analogues in Russia. *Ural'skiy geologicheskiy zhurnal* [Ural Geological Journal], no. 4 (34), pp. 81–122. (*In Russ.*)
5. Kuzmina V. G., Kravetsa B. N. 1990, Mineralurgy of vein quartz. Moscow, 294 p. (*In Russ.*)
6. Kuzmina N. I. 2007, Criteria for determining the limits of enrichment of various natural types of quartz raw materials. *Razvedka i okhrana nedr* [Exploration and protection of subsoil], no. 10, pp. 49–51. (*In Russ.*)
7. Ogorodnikov V. N., Polenov Yu. A., Nedosekova I. L., Savichev A. N. 2013, Granite pegmatites, carbonatites and hydrothermalites of the Ufaley metamorphic complex. Ekaterinburg, 283 p. (*In Russ.*)
8. Polenov Yu. A. 2008, Endogenous quartz-vein formations of the Urals. Ekaterinburg, 269 p. (*In Russ.*)
9. Sibelco. High Purity Quartz. URL: https://www.sibelco.com/materials/high-purity-quartz
10. The Quartz Corp. High Purity Quartz. URL: https://thequartzcorp.com/quartz/
11. Russian quartz. Products. (*In Russ.*) URL: https://russianquartz.com/produktsiya/
12. Yuzhnouralsk plant "Crystal". Products. (*In Russ.*) URL: http://www.kristallplant.com/produkciya
13. Ogorodnikov V. N., Polenov Yu. A., Savichev A. N. 2018, Particularly pure quartz of the Ufaley quartz-bearing region (Southern Urals). *Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta* [News of the Ural State Mining University], issue 1 (49), pp. 23–32. (*In Russ.*) https://doi.org/10.21440/2307-2091-2018-1-23-32

✉kgok@yandex.ru
**fgg.gl@m.ursmu.ru

14. Buryan Yu. I., Borisov L. A., Krasilnikov P. A. 2007, Quartz raw materials are the most important type of mineral resources for high-tech industries. *Razvedka i okhrana nedr* [Exploration and protection of subsoil], no. 10, pp. 9–12. (*In Russ*.) EDN: https://elibrary.ru/kdrzib
15. Zhaboyedov A. P., Nepomnyashchikh A. I., Solomein O. N. 2016, Development of technology for obtaining quartz concentrate from quartzites of the Eastern Sayan. *Izvestiya vuzov. Prikladnaya khimiya i biotekhnologiya* [News from universities. Applied chemistry and biotechnology], vol. 6, no. 4, pp. 92–99. (*In Russ*.) https://doi.org/10.21285/2227-2925-2016-6-4-92-99
16. Norsk Mineral. URL: https://www.nomin.no/our-history/-article318-270.html

The article was received on October 12, 2023

УДК 549.51: 552.164 http://doi.org/10.21440/2307-2091-2024-1-75-83

Ранние поперечные к слоистости кварцевые жилы в северной части Куларского района, Якутия: продольное укорочение жил и перекристаллизация кварца

Олег Анатольевич СУСТАВОВ*

Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия

Аннотация

Актуальность. При реконструкции некоторых особенностей тектонических процессов нередко используются кварцевые жилы. Они служат маркерами и кинематическими индикаторами, несущими сведения о тектонических движениях и их последовательности. Существенная информация может быть получена при изучении обусловленных тектоническими процессами деформационных структур и текстур жильного кварца в шлифах под микроскопом. Для использования подобной информации требуется знание процессов образования деформационных структур и текстур кварца в жилах, образовавшихся в различных условиях и на разных стадиях тектонических процессов. В настоящей статье приводятся новые данные о происходящих в начале коллизионного процесса образовании и деформации кварцевых жил в слабометаморфизованных терригенно-осадочных породах.

Цель исследования – изучение геологической позиции рассматриваемых кварцевых жил и их макро- и микродеформаций при формировании кливажа, исследование механизмов перекристаллизации жильного кварца.

Методы исследования – отбор образцов из кварцевых жил при минералогическом картировании северной части Куларского золотоносного района с последующим микроскопическим изучением шлифов жильного кварца.

Результаты и выводы. Рассматриваются поперечно-секущие слоистость кварцевые жилы, образовавшиеся в слабометаморфизованных терригенно-осадочных породах в начале коллизии. В ходе коллизионного сжатия и формирования в породах кливажа происходит продольное укорочение данных жил с приобретением их стенками конфигурации фестончато-лопастных складок. При этом слагавший жилы исходный крупнокристаллический кварц подвергается кристаллопластической деформации, сопровождаемой динамическим возвратом и перекристаллизацией (П). Перекристаллизованный кварц (ПК) с размерами зерен 0,06–0,45 мм образуется между и внутри реликтов исходного кварца. Механизм П – главным образом вращение субзерен. На это указывают развитие ПК каймами вокруг реликтов («структура ядра и мантии») и присутствие в реликтах исходного кварца субзерен, близких по размерам к зернам перекристаллизации (ЗП). Формирование межреликтовых ЗП, вытянутых под углом к направлению кливажа, а также внутрireликтовая П с образованием ЗП, которым свойственна близость размеров к поперечнику субзерен полигонизации в реликтах, а также ориентировка *c*-осей кварца под небольшими углами к *c*-осям вмещающих реликтов происходила при некоаксиальной деформации кварца. Относительно редкие ЗП неправильной формы с зубчатыми границами, значительно более крупные, чем субзерна матрицы, и которым не свойственна близкая ориентировка *c*-осей кварца к *c*-осям вмещающих реликтов, возникают при внутрireликтовой миграционной П. Разновидности ПК, присутствующие в рассматриваемых жилах, являются более крупнозернистыми, чем ПК в более поздних кварцевых жилах изученного района, что можно связывать с высокими температурами метаморфизма в начале коллизии.

***Ключевые слова*:** кварцевые жилы, продольное укорочение жил, фестончато-лопастные складки, микроструктуры жильного кварца, перекристаллизация вращением субзерен, миграционная перекристаллизация кварца.

Введение

При реконструкции отдельных особенностей тектонических процессов одним из предметов исследования в ряде случаев являются кварцевые жилы. Они служат маркерами и кинематическими индикаторами, несущими сведения о тектонических движениях и их последовательности [1–5]. Существенная информация может быть получена при изучении обусловленных тектоническими процессами деформационных структур и текстур жильного кварца в шлифах под микроскопом [1, 4, 6–9]. Для интерпретации подобной информации требуется

✉fgg.mpg@m.ursmu.ru

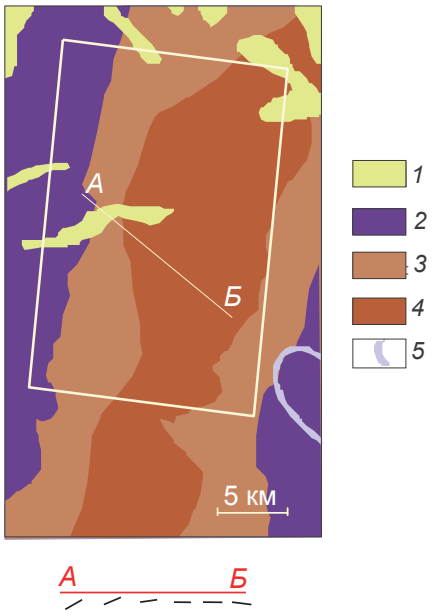


Рисунок 1. Схема геологического строения северной части Улахан-Сисской антиклинали (схематизировано по геологической карте масштаба 1 : 1 000 000): *1* – четвертичные отложения; *2* – триас; *3* – туогучанская свита верхней перми; *4* – тарбаганнахская свита верхней перми; *5* – река Яна; белая рамка – изученная площадь, внизу – ориентировка кливажа S_1 в разрезе по *АБ* [12]
Figure 1. The scheme of the geological structure of the Northern part of the Ulakhan-Sissky antiform (according to the geological map of the scale 1 : 1 000 000): *1* – quaternary deposits; *2* – lower Triassic; *3* – Tuoguchansky suite of upper Permian; *4* – Tarbagannahsky suite of upper Permian; *5* – Yana River; white frame – the studied area, at the bottom – the orientation of cleavage S_1 in the section *АБ* [12]

знание процессов образования деформационных структур и текстур кварца в жилах, образовавшихся в различных условиях и на разных стадиях тектонических процессов.

В настоящей статье приводятся новые данные об отчасти охарактеризованных ранее [7, 10] процессах деформации кварцевых жил, поперечно секущих слабометаморфизованные терригенные породы в северной части Куларского золотоносного района Якутии.

Район располагается на северо-западном фланге Кулар-Нерского сланцевого пояса Верхояно-Колымской орогенной области, сложенном углеродистыми сланцами и турбидитами склона и подножия Верхоянской пассивной континентальной окраины. Породы подвержены складчатости в поздней юре–раннем мелу при коллизии Сибирского кратона и Колымо-Омолонского супертеррейна [11]. Здесь находится сложенная породами пермского возраста Улахан-Сисская антиклиналь северо-восточного простирания, длиной более 100 км и шириной до 20 км. Углы падения слоев и субпараллельного им кливажа S_1 в сводовой части антиклинали (тарбаганнахская свита верхнепермского возраста) не превышают 3–7°. В данной статье рассматриваются кварцевые жилы, поперечно секущие слоистость пород тарбаганнахской свиты в северной части Улахан-Сисской антиклинали (на левобережье реки Яна между ручьями Тарбаганнах, Батор-Юрэх на юге и горой Мунулу на севере), рис. 1.

Материалы и методы

Образцы поперечно секущих кварцевых жил и слагающего их деформированного жильного кварца (35 образцов) отобраны при изучении обнаженных участков местности в процессе минералогического картирования северной части Куларского золотоносного района [7]. Для микроскопических исследований из данных образцов изготовлено 46 шлифов. Шлифы вырезались поперек стенок жил, перпендикулярно шарнирам присутствующих на стенках жил сближенных фестончато-лопастных складок (см. далее). В отдельных случаях из одного образца изготавливались шлифы по трем взаимно перпендикулярным направлениям. При изучении под микроскопом шлифов кварца определялись степень перекристаллизации (П) кварца, размеры зерен перекристаллизации (ЗП) и характер локализации перекристаллизованного кварца (ПК), находящегося между и внутри реликтов исходного кварца. За размер ЗП принимался поперечник выбранного в шлифе зерна, имеющего визуально средние для изучаемой совокупности зерен размеры. Изучались различия размеров меж- и внутрireликтовых ЗП, соотношения между ЗП и субзернами полигонизации в реликтах. Выделялись разновидности ЗП по размеру, форме, характеру ориентировки *c*-осей кварца (в скрещенных николях под микроскопом с использованием гипсового компенсатора) и расположению внутри реликтов.

Результаты

Тарбаганнахская свита верхнепермского возраста, к которой приурочены рассматриваемые кварцевые жилы, в изученном районе сложена углеродистыми сланцами (преимущественно метааргиллитами и метаалевролитами), среди которых залегают отдельные пласты метапесчаников.

Углеродистые сланцы состоят в основном из кварца, серицита, углеродистого вещества и хлорита. Метапесчаники главным образом мелко- и тонкозернистые (размер обломков преимущественно 0,2–0,05 мм) граувакковые (наряду с обломками кварца и плагиоклаза в них содержится более 25 % обломков пород); могут также присутствовать, преимущественно в матриксе, серицит, хлорит, карбонаты и углеродистое вещество. В породах развит субпараллельный слоистости кливаж S_1 [12] (рис. 1); в метапесчаниках он наблюдается в виде совокупности срезающих края обломочных зерен серицит-углеродистых кливажных зон толщиной в тысячные доли миллиметра, которые отстоят между собой на расстояния до 0,1–0,2 мм («межзерновой» кливаж) [4].

Породы тарбаганнахской свиты метаморфизованы в условиях мусковит-хлоритовой и биотитовой субфаций зеленосланцевой фации [7, 13], в связи с чем кварц в породах в той или иной степени перекристаллизован [13]. В метапесчаниках ЗП размерами преимущественно 0,04–0,06 мм образуются по краям обломков кварца, реже наблюдается полная перекристаллизация обломков.

В породах тарбаганнахской свиты наряду с другими кварцевыми жилами [7] встречаются поперечно секущие кливаж S_1 (преимущественно под углом 70–90°) жилы мощностью до 0,4 м, стенки которых имеют форму фестончато-лопастных (cuspate-lobate) [4, 14] складок. Таким складкам свойственно чередование острых шарни-

ров – «фестонов» (cusps) и округлых изгибов – «лопастей» (lobes). Согласно [14], данные складки могут образовываться при продольном укорочении жесткого слоя, погруженного в менее вязкое вещество (при малом контрасте вязкости), когда происходит сильное уменьшение длины слоя и увеличение его мощности. Фестончато-лопастные (ф.-л.) складки проявляются в конфигурации границ жесткого слоя – рис. 2 («муллионы» [4, 15]).

Расстояния между смежными шарнирами субпараллельных ф.-л. складок на стенках рассматриваемых жил изменяются от долей миллиметра до 1–3 см (рис. 3, *б*). При этом вершины фестонов направлены в сторону жилы, а лопасти (обычно более широкие, чем фестоны) – в сторону вмещающей породы.

Как показывают наблюдения под микроскопом, первоначально данные жилы были сложены достаточно крупнозернистым (размер зерен более 1 мм в поперечнике) грубошестоватым кварцем (агрегатом вытянутых поперек стенок жил индивидов размерами более 1 мм в поперечнике), местами переходящим в кварц аллотриоморфной структуры (рис. 3, *в*). При продольном укорочении жил слагающий их кварц подвергался интенсивной пластической деформации и перекристаллизации. При пластической деформации в индивидах кварца возникают изгибы кристаллической решетки (волнистое угасание) на угол до 50–60°. Волна угасания преимущественно параллельна направлению *c*-оси в индивидах кварца и состоит из отдельных вытянутых вдоль *c*-оси слабо разориентированных между собой субзерен полигонизации (рис. 3, *в*, *1*).

Перекристаллизация кварца происходит ориентированными главным образом поперек стенок жил (субпараллельно кливажу вмещающих пород) полосами толщиной от одного до десятков ЗП размерами 0,07–0,18 мм. Полосы ПК идут по границам индивидов исходного кварца (рис. 3, *в*) или пересекают индивиды. По мере увеличения количества полос ПК и их ширины на месте исходного крупнокристаллического кварца может образовываться почти сплошной ПК.

Находящиеся между полосами ПК целые индивиды исходного кварца или их части будем называть реликтами исходного кварца. Так как полосы ПК ориентированы главным образом поперек стенок жил, форма реликтов чаще всего полосовидная, вытянутая поперек стенок жил; *c*-оси кварца в этих реликтах ориентированы под разными углами к вытянутости реликтов (рис. 3, *в*). Среди полосовидных реликтов иногда имеются и отдельные реликты субизометричной формы. В них оси *c* обычно ориентированы вдоль стенок жил, поперек вытянутости окружающих полосовидных реликтов (рис. 3, *в*, *3*).

Перекристаллизация по границам реликтов («межреликтовая» П) приводит к образованию так называемых [1, 8, 16] «структур ядра и мантии»: ядро – монокристальный реликт, мантия – кайма окружающих его ЗП (рис. 3, *в*). При этом в мантии наряду с ЗП могут находить-

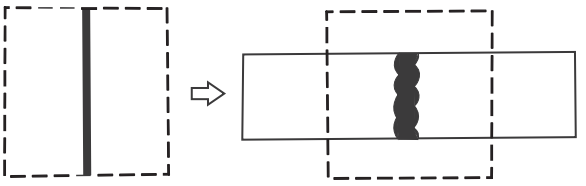


Рисунок 2. Образование фестончато-лопастных складок при вертикальном продольном сжатии жесткого слоя (черное) в пластичной матрице при малом контрасте вязкости между слоем и матрицей (по [14], с. 392, с изменениями)
Figure 2. Formation of cuspate-lobed folds during vertical longitudinal compression of a rigid layer (black) in a plastic matrix with a small viscosity contrast between the layer and the matrix (according to [14], p. 392, with changes)

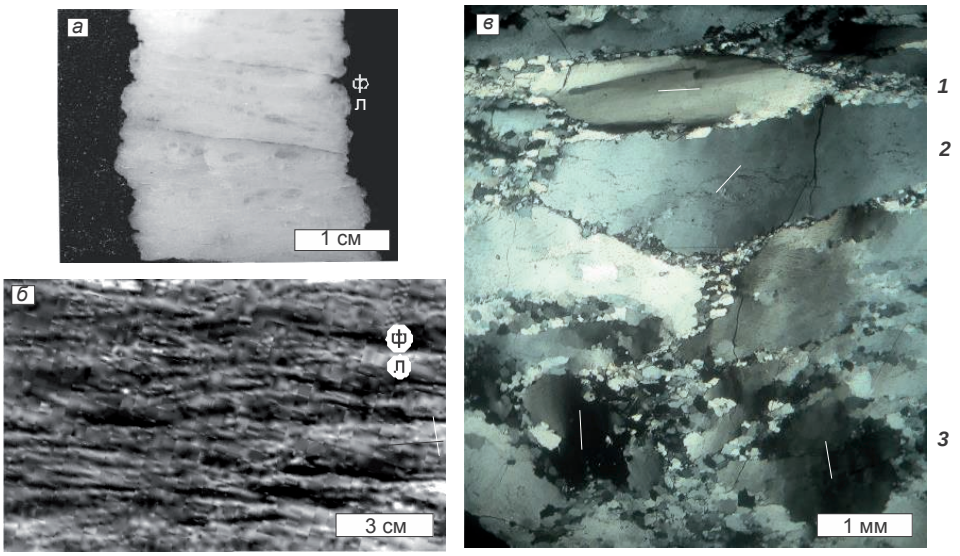


Рисунок 3. Кварцевые жилы с фестончато-лопастной конфигурацией стенок (ф – фестоны, л – лопасти) в углеродистых породах (кливаж S_1 ориентирован горизонтально): *а* – поперечное сечение жилы; *б* – поверхность стенки жилы; *в* – шлиф поперек жилы, николи скрещены, штрихи – ориентировка *c*-осей кварца; *1*, *2*, *3* – объяснения в тексте
Figure 3. Quartz veins with a cuspate-lobed configuration of the walls (ф – cusps, л – lobes) in carbonaceous rocks (cleavage S_1 is oriented horizontally): *a* – cross sections of the vein; *b* – surface of the vein wall; *c* – thin section across the vein, nichols crossed, white strokes – orientation *c*-axes of quartz; *1*, *2*, *3* – explanations in the text

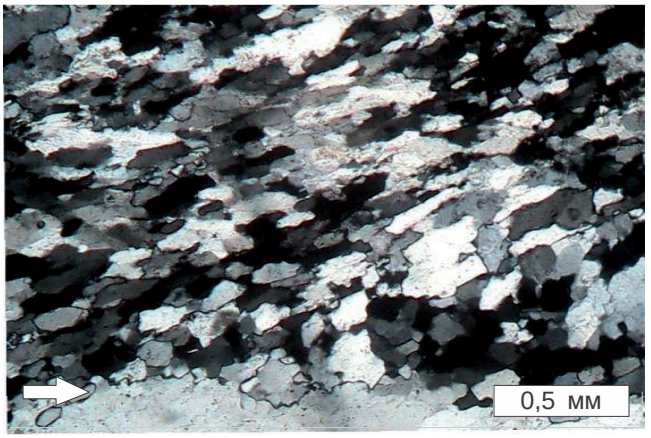


Рисунок 4. Межреликтовые зерна перекристаллизации, вытянутые под углом к удлинению реликта (стрелка внизу – направление границы реликта); николи скрещены
Figure 4. Interrelict grains of recrystallization, elongated at an angle to the elongation of the relict (arrow below – direction of the relict boundary); nichols are crossed

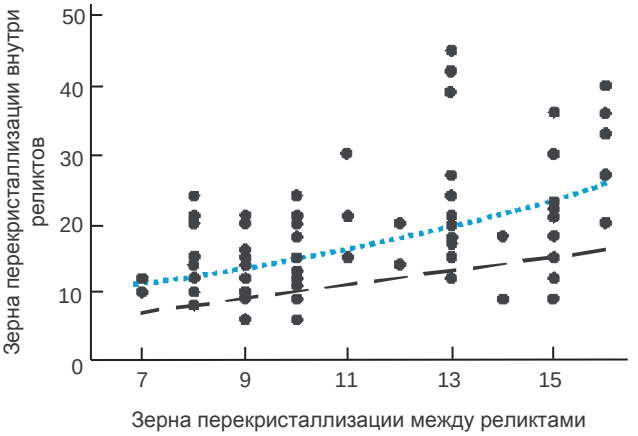


Рисунок 5. Размеры совместно присутствующих в одном и том же шлифе внутри- и межреликтовых зерен перекристаллизации (средние значения, сотые доли миллиметра); черный пунктир – линия равных размеров тех и других зерен, синий пунктир – линия экспоненциального тренда для всей совокупности замеров
Figure 5. Dimensions of intra- and inter-relict recrystallization grains present together in the same thin section (average values, hundredths of a millimeter); the black dotted line is a line of equal sizes of those and other grains, the blue dotted line is an exponential trend line for the entire set of measurements

ся отдельные субзерна ядра, сходные по размерам и форме с ЗП и отличающиеся от последних главным образом лишь меньшими углами разориентировки *c*-осей относительно *c*-оси исходного реликта.

Межреликтовые ЗП имеют субизометричную (рис. 3, *в*), реже вытянутую форму. В последнем случае ЗП могут быть вытянуты параллельно удлинению полосовидных реликтов или же (в некоторых нацело перекристаллизованных участках кварца) под углом до 10–15° к удлинению реликтов (*SC*-текстура [4]) – рис. 4.

Наряду с приуроченными к полосам ПК межреликтовыми ЗП встречаются и внутрireликтовые ЗП. Последние преимущественно крупнее межреликтовых ЗП (см. положение линий равных размеров тех и других ЗП на рис. 5). Размеры межреликтовых ЗП (0,07–0,18 мм) соответствуют размерам мелких субизометричных субзерен полигонизации, развитых в краевых частях реликтов, а размеры внутрireликтовых ЗП (0,06–0,45 мм) обычно близки к поперечнику вытянутых по *c*-оси более крупных субзерен полигонизации центральных частей реликтов. Причем внутрireликтовые ЗП преимущественно тем крупнее, чем более крупнозернисты межреликтовые ЗП (см. линию экспоненциального тренда на рис. 5). Увеличение размеров тех и других ЗП нередко происходит параллельно с увеличением степени перекристаллизации кварца.

Внутрireликтовые ЗП (особенно относительно мелкие, приближающиеся по своим размерам к межреликтовым ЗП) нередко развиты цепочками, ориентированными параллельно или под небольшим углом к вытянутости реликтов (т. е. близко к направлению кливажа S_1 вмещающих пород). Иногда полосы данных ЗП приурочены к ориентированным вдоль вытянутости реликтов слабо выраженным микросдвигам в кварце (рис. 6, *а*).

Такие внутрireликтовые ЗП характеризуются близостью ориентировки *c*-осей кварца к направлению *c*-оси вмещающего реликта – угол между *c*-осями ЗП и вмещающего реликта часто не превышает 30° (рис. 6, *а–в*). При этом *c*-оси ЗП ориентированы преимущественно под меньшими углами к вытянутости реликтов, чем *c*-оси реликтов (рис. 6) [17]. В связи с этим для данных ЗП обычно характерна четкая преимущественная ориентировка *c*-осей, особенно хорошо заметная при наблюдении кварца в скрещенных николях при введенном гипсовом компенсаторе. Близкую ориентировку *c*-осей к *c*-осям вмещающих реликтов нередко имеют также многие более крупные внутрireликтовые ЗП, вытянутые параллельно удлинению реликтов (рис. 6, *в*).

Иногда внутри реликтов встречаются также крупные ЗП, не обладающие отмеченной преимущественной ориентировкой *c*-осей. Они имеют неправильную форму, зубчатые границы и часто располагаются у краев реликтов. В отличие от внутрireликтовых ЗП, описанных ранее, данные ЗП крупнее, чем субзерна во вмещающих реликтах исходного кварца (рис. 7). Межреликтовый ПК, окружающий реликты, содержащие данные крупные внутрireликтовые ЗП, также относительно крупнозернист (размеры зерен 0,11–0,16 мм).

Обсуждение результатов

Рассматриваемые в данной статье кварцевые жилы, поперечно секущие слоистость, относятся к наиболее ранним кварцевым жилам данного района [7, 10]. Они образуются путем заполнения поперечно секущих трещин отрыва во вмещающих субгоризонтально залегающих терригенно-осадочных породах. На это указывает как характер залегания этих жил, так и преимущественно грубошестоватая структура исходного крупнозернистого кварца, индивиды которого вытянуты поперек стенок жил.

По [3], подобное поперечное к слоистости кварцевое жилообразование является самым ранним проявлением коллизионных процессов. Согласно [18], вертикальные трещины отрыва могут быть первыми трещинами, появляющимися при формировании складчато-надвиговых поясов в самом начале зарождающегося регионального сжатия. Образование таких жил растяжения происходит

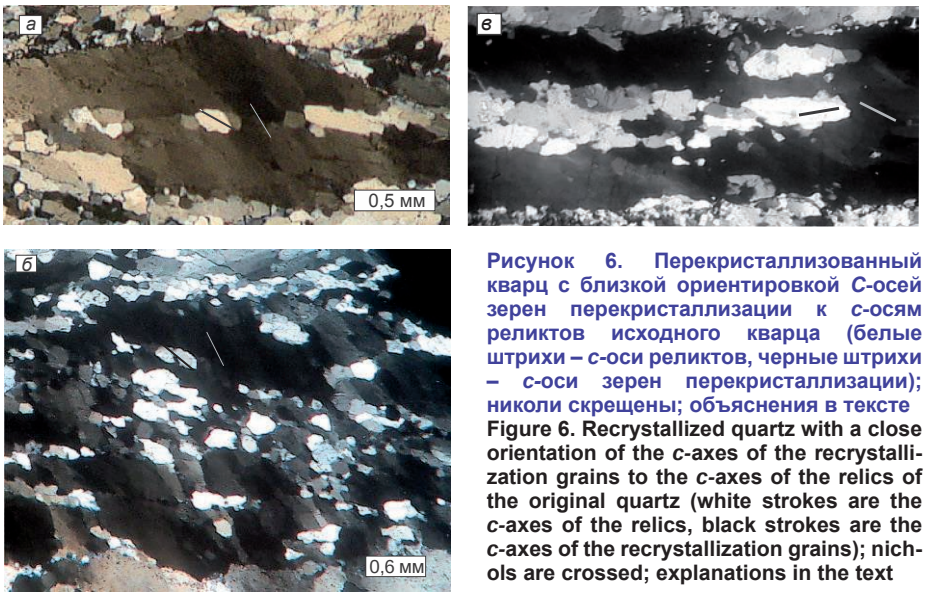


Рисунок 6. Перекристаллизованный кварц с близкой ориентировкой *С*-осей зерен перекристаллизации к *с*-осям реликтов исходного кварца (белые штрихи – *с*-оси реликтов, черные штрихи – *с*-оси зерен перекристаллизации); николи скрещены; объяснения в тексте
Figure 6. Recrystallized quartz with a close orientation of the *c*-axes of the recrystallization grains to the *c*-axes of the relics of the original quartz (white strokes are the *c*-axes of the relics, black strokes are the *c*-axes of the recrystallization grains); nichols are crossed; explanations in the text

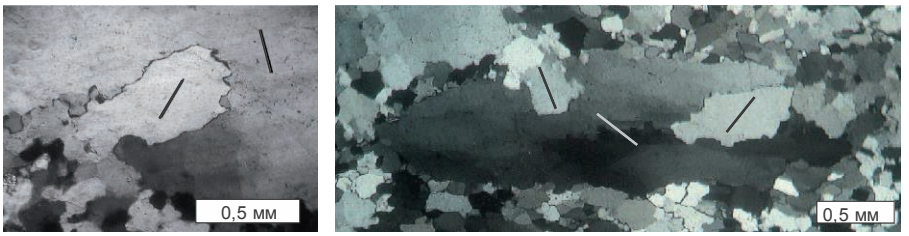


Рисунок 7. Крупные внутрireликтовые зерна перекристаллизации, *с*-оси которых (черные штрихи) ориентированы под разными углами к *с*-осям вмещающих реликтов исходного кварца (белые штрихи); николи скрещены
Figure 7. Large intra-relict grains of recrystallization, whose *c*-axes (black strokes) are oriented at different angles to the *c*-axes of the containing relics of the original quartz (white strokes); nichols are crossed

при возникновении в данных условиях высоких, до сверхлитостатических, давлений флюидов [3].

В ходе дальнейшего коллизионного сжатия рассматриваемые кварцевые жилы подвергаются продольному укорочению. На последнее указывает конфигурация стенок жил в виде ф.-л. складок, ориентированных поперек удлинения жил (рис. 3, *а, б*). Направление вершин фестонов в сторону кварцевой жилы, а широких лопастей – в сторону вмещающей породы соответствует характерной для ф.-л. складок [14] направленности вершин фестонов в сторону более вязкого, а лопастей – в сторону менее вязкого слоя.

Продольное укорочение кварцевых жил происходит при формировании в начале коллизии кливажа S_1 (в других районах близость во времени начала коллизии и образования кливажа отмечается в [5, 19], развитие кливажа совместно с подобной деформацией кварцевых жил – в [2]). При формировании кливажа S_1 происходит сплющивание пород поперек S_1 [12]. Так как кливаж S_1 субпараллелен слоистости пород, а жилы имеют поперечно-секущее S_1 залегание, то при образовании S_1 жилы подвергаются продольному укорочению. При этом стенки жил приобретают форму ф.-л. складок, простирание шарниров которых близко к направлению линий пересечения стенок жил кливажем S_1.

При продольном укорочении жил слагающий их кварц подвергается кристаллопластической деформации, сопровождаемой динамическими возвратом и перекристаллизацией. В результате сжатия при продольном укорочении жил реликты исходного кварца подвергают уплощению. Ориентировка *с*-осей реликтов преимущественно под косыми углами к направлению сжатия (рис. 6) позволяет кварцу деформироваться с участием наиболее легко активируемого базисного и призматического внутрикристаллического скольжения [17]. Отдельные редкие изометричные реликты, *с*-оси которых направлены вдоль направления сжатия (субпараллельно стенкам жил), не подвергаются уплощению и сохраняют изометричную форму, так как имеют неблагоприятную для отмеченного ранее скольжения ориентировку [17].

Перекристаллизация кварца рассматриваемых жил соответствует главным образом обычной для зеленосланцевой фации метаморфизма [8] перекристаллизации вращением субзерен – исходный кварц подвергается полигонизации с возникновением слабо разориентированных субзерен, которые при последующих поворотах преобразуются в ЗП. При образовании межреликтовых ЗП к признакам П вращением субзерен относят [8, 16] развитие П каймами вокруг реликтов («структура ядра и мантии» – рис. 3, *в*; 6, *а*; 7) и присутствие по краям реликтов исходного кварца субзерен, близких по размерам к межреликтовым ЗП.

При П вращением субзерен могут образовываться как субизометричные, так и удлиненные межреликто-

вые ЗП. «Косая» по отношению к вытянутости реликтов и направлению кливажа S_1 ориентировка удлиненных ЗП (рис. 4) возникает при некоаксиальной деформации кварца [20, 21], причем направление удлинения ЗП указывает на знак сдвига при деформации [22] (например, на рис. 4 – правый сдвиг).

Посредством П вращения субзерен возникали и многие внутрireликтовые ЗП, близкие по размерам к поперечнику субзерен полигонизации в реликтах и обладающие преимущественной ориентировкой *c*-осей под углами в первые десятки градусов по отношению к *c*-осям реликтов (рис. 6). Эта зависимость размеров и ориентировки ЗП от размеров и ориентировки субзерен является одним из главных признаков внутрireликтовой П вращением субзерен [6, 9, 17, 18, 23]. Формирование таких внутрireликтовых ЗП в виде цепочек, ориентированных параллельно или под небольшим углом к направлению кливажа S_1 вмещающих пород и местами приуроченных к микросдвигам [6] в реликтах, происходит при некоаксиальной деформации кварца [24].

Возникновение относительно редких внутрireликтовых ЗП неправильной формы с зубчатыми границами, значительно более крупных, чем субзерна матрицы (рис. 7), может быть связано с так называемой миграционной П [8, 22, 23, 25, 26]; сходные с наблюдаемыми нами зерна миграционной П показаны в [17] – (fig. 4, *a*). Согласно отмеченным авторам, миграционная П по сравнению с П вращением субзерен происходит при более высоких температурах и более низких дифференциальных напряжениях. По [5], температура перехода от П вращением субзерен к П миграции границ – около 400 °С. Появление крупных зерен миграционной П внутри, а не между реликтами исходного кварца, соответствует данным об образовании крупных ЗП при меньших напряжениях, чем более мелких ЗП [27], а также об относительно низких напряжениях при П внутри реликтов по сравнению с П между реликтами [28].

В заключение следует отметить, что разновидности ПК, присутствующие в рассматриваемых жилах, являются более крупнозернистыми, чем ПК в многочисленных более поздних кварцевых жилах изученного района [7] (подобное отмечается в работе [29]). Это можно связывать с более высокими температурами П кварца рассматриваемых в данной статье ранних жил [7]. Последнее подтверждается иногда отмечаемым, в отличие от более поздних жил, присутствием в ПК данных ранних жил ильменита, а также биотита [10] – минерала, фиксирующего максимальный уровень метаморфизма в изучаемом районе. Приуроченность наиболее крупнозернистого перекристаллизованного кварца и биотита к данным ранним кварцевым жилам указывает на повышенные температуры метаморфизма в начале коллизии, что отмечается и в других регионах [5, 29].

Выводы

1. Образование ранних поперечно секущих слоистость кварцевых жил происходило в самом начале зарождающегося коллизионного сжатия. По мере дальнейшего коллизионного сжатия происходило продольное укорочение жил с приобретением их стенками конфигурации фестончато-лопастных складок. При этом исходный кварц данных жил подвергался кристаллопластической деформации, сопровождаемой динамическими возвратом и перекристаллизацией.

2. Перекристаллизованный кварц (сложенный изометричными и удлиненными ЗП размерами 0,06–0,45 мм в поперечнике) образуется между и внутри реликтов исходного кварца. Перекристаллизация кварца происходит главным образом вращением субзерен, признаками чего являются развитие перекристаллизованного кварца каймами вокруг реликтов («структура ядра и мантии») и присутствие в реликтах исходного кварца субзерен, близких по размерам к ЗП.

3. Формирование межреликтовых ЗП, вытянутых под углом к направлению кливажа, а также внутрireликтовая перекристаллизация с образованием ЗП, которым свойственна близость размеров к поперечнику субзерен полигонизации в реликтах, а также ориентировка *c*-осей кварца под небольшими углами к *c*-осям вмещающих реликтов связаны с протеканием перекристаллизации при некоаксиальной деформации кварца.

4. Относительно редкие ЗП неправильной формы с зубчатыми границами, значительно более крупные, чем субзерна матрицы, и которым не свойственна близкая ориентировка *c*-осей кварца к *c*-осям вмещающих реликтов, возникают при внутрireликтовой миграционной перекристаллизации.

5. Разновидности перекристаллизованного кварца, присутствующие в рассматриваемых жилах, являются более крупнозернистыми, чем перекристаллизованный кварц в более поздних кварцевых жилах изученного района, что можно связывать с повышенными температурами метаморфизма в начале коллизии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Passchier C. W., Trouw R. A. J. Microtectonics. Berlin; Heidelberg; N. Y.: Springer, 2005. 366 p.
2. Trepmann C. A., Stöckhert B. Microfabric of folded quartz veins in metagreywackes: dislocation creep and subgrain rotation at high stress // Journal of metamorphic Geology. 2009. Vol. 27. Issue 8. P. 555–570. https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.2009.00842.x
3. Van Noten K., Muchez P., Sintubin M. Stress-state evolution of the brittle upper crust during compressional tectonic inversion as defined by successive quartz vein types (High-Ardenne slate belt, Germany) // Journal of the Geological Society. 2011. Vol. 168. P. 407–422. https://doi.org/10.1144/0016-76492010-112
4. Кирмасов А. Б. Основы структурного анализа. М.: Научный мир, 2011. 368 с.
5. Kidder S., Avouac J.-P., Chan Y.-C. Application of titanium-in-quartz thermobarometry to greenschist facies veins and recrystallized quartzites in the Hsüehshan range, Taiwan // Solid Earth. 2013. Vol. 4. Issue 1. P. 1–21. https://doi.org/10.5194/SE-4-1-2013
6. Суставов О. А. Рекристаллизация жильного кварца в зоне Мурзинского сдвига (Средний Урал) // Известия АН СССР. Сер. геол. 1987. № 2. С. 91–99.
7. Суставов О. А. Деформации жильного кварца при формировании золотого оруденения в черносланцевых толщах (Куларский район, Восточная Якутия) // Геология и геофизика. 1995. № 4. С. 81–87.

8. Stipp M., Stünitz H., Heilbronner R., Schmid S. M. The eastern Tonale fault zone: a “natural laboratory” for crystal plastic deformation of quartz over a temperature range from 250 to 700 °C // Journal of Structural Geology. 2002. Vol. 24. Issue 12. P. 1861–1884. https://doi.org/10.1016/S0191-8141(02)00035-4
9. Vernon R. H. A practical guide to rock microstructure. Cambridge: Cambridge University Press, 2018. 431 p. https://doi.org/10.1017/9781108654609
10. Суставов О. А. Рекристаллизация жильного кварца при формировании кливажа в метапсаммитах Куларского района (Якутия) // Известия вузов. Геология и разведка. 1988. № 10. С. 33–39.
11. Парфенов Л. М., Оксман В. С., Прокопьев А. В., Тимофеев В. Ф., Третьяков Ф. Ф., Трунилина В. А., Дейкуненко А. В. Коллаж террейнов Верхояно-Колымской орогенной области // Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия) / под ред. Л. М. Парфенова и М. И. Кузьмина. М.: МАИК «Наука/Интерпериодика», 2001. С. 199–254.
12. Суставов О. А. Микроструктуры кливажа и индикаторы растяжения в черносланцевых породах северной части Улахан-Сисской антиформы (Куларский район, Якутия) // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2021. Т. 26. № 3. С. 31–42. https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-3-31-42
13. Суставов О. А. Кливаж и перекристаллизация кварца в терригенных породах верхоянского комплекса (Яно-Индигирская зона) // Известия УГГГА. Сер. Геология и геофизика. 1998. Вып. 8. С. 49–55.
14. Ramsay J. G., Huber M. I. The Techniques of Modern Structural Geology. Vol. 2. Folds and Fractures. London: Academic press, 1987. 700 p.
15. Urai J. L., Spaeth G., van der Zee W., Hilgers C. Evolution of Mullion (formerly boudin) structures in the Variscan of the Ardennes and Eifel // Journal of the Virtual Explorer. 2001. Vol. 3. P. 1–16. https://doi.org/10.3809/JVIRTEX.2001.00027
16. Hirth G., Tullis J. Dislocation creep regimes in quartz aggregates // Journal of Structural Geology. 1992. Vol. 14. Issue 2. P. 145–159. https://doi.org/10.1016/0191-8141(92)90053-Y
17. Law R. D. Relationship between strain and quartz crystallographic fabrics in the Roche Maurice quartzites of Plougastel, western Brittany // Journal of Structural Geology. 1986. Vol. 8. Issue 5. P. 493–515. https://doi.org/10.1016/0191-8141(86)90001-5
18. Ferill D. A., Smart K. J., Cawood A. J., Morris A. P. The fold-thrust belt stress cycle: Superposition of normal, strike-slip, and thrust faulting deformation regimes // Journal of Structural Geology. 2021. Vol. 148. Article number 104362. https://doi.org/10.1016/j.jsg.2021.104362
19. Chen C.-T., Chan Yu.-C., Lo C.-H., Malavieille J., Lu C.-Yu., Tang J.-T., Lee Yu.-H. Basal accretion, a major mechanism for mountain building in Taiwan revealed in rock thermal history // Journal of Asian Earth Sciences. 2018. Vol. 152. P. 80–90. https:// doi.org/10.1016/j.jseaes.2017.11.030
20. Law R. D., Casey M., Knipe R. J. Kinematic and tectonic significance of microstructures and crystallographic fabrics within quartz mylonites from the Assynt and Eriboll regions of the Moine thrust zone, NW Scotland // Transactions of the Royal Society of Edinburgh. Earth sciences. 1986. Vol. 77. Issue 2. P. 99–125. https://doi.org/10.1017/S0263593300010774
21. Lister G. S. S-C Mylonites // Journal of Structural Geology. 1984. Vol. 6. Issue 6. P. 617–638. https://doi.org/10.1016/0191-8141(84)90001-4
22. Behr W. M., Platt J. P. A naturally constrained stress profile through the middle crust in an extensional terrane // Earth and Planetary Science Letters. 2011. Vol. 303. Issue 3–4. P. 181–192. http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2010.11.044
23. Lloyd G. E., Freeman B. Dynamic recrystallization of quartz under greenschist conditions // Journal of Structural Geology. 1994. Vol. 16. Issue 6. P. 867–881. https://doi.org/10.1016/0191-8141(94)90151-1
24. Bestmann M., Pennacchioni G., Nielsen S., Göken M., de Wall H. Deformation and ultrafine dynamic recrystallization of quartz in pseudotachylyte-bearing brittle faults: A matter of a few seconds // Journal of Structural Geology. 2012. Vol. 38. P. 21–38. http://dx.doi.org/10.1016/j.jsg.2011.10.001
25. Stipp M., Tullis J., Scherwath M., Behrmann J. H. A new perspective on paleopiezometry: Dynamically recrystallized grain size distributions indicate mechanism changes // Geology. 2010. Vol. 38. No. 8. P. 759–762. https://doi.org/10.1130/G31162.1
26. Mancktelow N. S., Pennacchioni G. The influence of grain boundary fluids on the microstructure of quartz-feldspar mylonites // Journal of Structural Geology. 2004. Vol. 26. Issue 1. P. 47–69. https://doi.org/10.1016/S0191-8141(03)00081-6
27. Heilbronner R., Kilian R. The grain size(s) of Black Hills Quartzite deformed in the dislocation creep regime // Solid Earth. 2017. Vol. 8. Issue 5. P. 1071–1093. http://dx.doi.org/10.5194/se-8-1071-2017
28. Tullis J. Deformation of Granitic Rocks: Experimental Studies and Natural Examples // Reviews in Mineralogy and Geochemistry. 2002. Vol. 51. No. 1. P. 51–95. https://doi.org/10.2138/GSRMG.51.1.51
29. Krenn K., Fritz H., Mogessie A., Schaflechner J. Late Cretaceous exhumation history of an extensional extruding wedge (Graz Paleozoic Nappe Complex, Austria) // International Journal of Earth Sciences. 2007. Vol. 97. Issue 6. P. 1331–1352. https://doi.org/10.1007/s00531-007-0221-z

Статья поступила в редакцию 26 ноября 2023 года

http://doi.org/10.21440/2307-2091-2024-1-75-83

UDC 549.51: 552.164

Early quartz veins transverse to bedding in the northern part of the Kular region, Yakutia: longitudinal shortening of the veins and recrystallization of quartz

Oleg Anatol'evich SUSTAVOV*

Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia

Abstract

Relevance. When reconstructing certain features of tectonic processes, quartz veins are often used. They serve as markers and kinematic indicators that carry information about tectonic movements and their sequence. Significant information can be obtained by studying the deformation structures and textures of vein quartz in thin sections caused by tectonic processes under a microscope. To use such information, knowledge of the processes of formation of deformation structures and textures of quartz in veins formed under different conditions and at different stages of tectonic processes is required. This article provides new data on the formation and deformation of quartz veins occurring at the beginning of the collision process in weakly metamorphosed terrigenous-sedimentary rocks.

The purpose of the research is to study the geological position of the quartz veins under consideration and their macro- and micro-deformations during the formation of cleavage, and to study the mechanisms of recrystallization of vein quartz.

Research methods. Sampling from quartz veins during mineralogical mapping of the northern part of the Kular gold-bearing region, followed by microscopic examination of thin sections of vein quartz.

Results and conclusions. We consider quartz veins that cross-cut the bedding and were formed in weakly metamorphosed terrigenous sedimentary rocks at the beginning of the collision. During collisional compression and the formation of cleavage in rocks, longitudinal shortening of these veins occurs with their walls acquiring the configuration of scalloped-lobate folds. In this case, the original coarse-crystalline quartz that formed the veins is subjected to crystallo-plastic deformation, accompanied by dynamic recovery and recrystallization (R). Recrystallized quartz (RQ) with grain sizes of 0.06–0.45 mm is formed between and inside relics of the original quartz. Mechanism R is mainly the rotation of subgrains. This is indicated by the development of quartz rims around the relics ("structure of the core and mantle") and the presence in the relics of the original quartz of subgrains close in size to recrystallization grains (RGs). The formation of interrelict RGs, elongated at an angle to the direction of cleavage, as well as intrarelict R with the formation of RGs, which are characterized by similar sizes to the diameter of the polygonization subgrains in the relics, as well as the orientation of the c-axes of quartz at small angles to the c-axes of the host relics, occurred during non-coaxial deformation of quartz. Relatively rare irregularly shaped RGs with jagged boundaries, much larger than matrix subgrains, and which are not characterized by close orientation of the c-axes of quartz to the c-axes of the host relics, arise during intra-relict migration R. The varieties of RQ present in the veins under consideration are more coarse-grained than RQ in later quartz veins of the studied area, which can be associated with high temperatures of metamorphism at the beginning of the collision.

***Keywords*:** quartz veins, longitudinal shortening of veins, scalloped-lobate folds, microstructures of vein quartz, recrystallization by rotation of subgrains, migration recrystallization of quartz.

REFERENCES

1. Passchier C. W., Trouw R. A. J. 2005, Microtectonics. Berlin; Heidelberg; N. Y., 366 p.

2. Trepmann C. A., Stöckhert B. 2009, Microfabric of folded quartz veins in metagreywackes: dislocation creep and subgrain rotation at high stress. *Journal of metamorphic Geology*, vol. 27, issue 8, pp. 555–570. https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.2009.00842.x

3. Van Noten K., Muchez P., Sintubin M. 2011, Stress-state evolution of the brittle upper crust during compressional tectonic inversion as defined by successive quartz vein types (High-Ardenne slate belt, Germany). *Journal of the Geological Society*, vol. 168, pp. 407–422. https://doi.org/10.1144/0016-76492010-112

4. Kirmasov A. B. 2011, Fundamentals of structural analysis. Moscow, 368 p. (*In Russ.*)

5. Kidder S., Avouac J. P., Chan Y. C. 2013, Application of titanium-in-quartz thermobarometry to greenschist facies veins and recrystallized quartzites in the Hsüehshan range, Taiwan. *Solid Earth*, vol. 4, issue 1, pp. 1–21. https://doi.org/10.5194/SE-4-1-2013

6. Sustavov O. A. 1987, Recrystallization of vein quartz in the Murzin shear zone (Middle Urals). *Izvestiya Akademii Nauk SSSR* [News of the USSR Academy of Sciences], no. 2, pp. 91–99. (*In Russ.*)

7. Sustavov O. A. 1995, Deformations of vein quartz during the formation of gold mineralization in black shale strata (Kularsky district, Eastern Yakutia). *Geologiya i geofizika* [Geology and Geophysics], no. 4, pp. 81–87. (*In Russ.*)

✉fgg.mpg@m.ursmu.ru

8. Stipp M., Stünitz H., Heilbronner R., Schmid S. M. 2002, The eastern Tonale fault zone: a "natural laboratory" for crystal plastic deformation of quartz over a temperature range from 250 to 700 °C. *Journal of Structural Geology*, vol. 24, issue 12, pp. 1861–1884. https://doi.org/10.1016/S0191-8141(02)00035-4
9. Vernon R. H. 2018, A practical guide to rock microstructure. Cambridge: Cambridge University Press, 431 p. https://doi.org/10.1017/9781108654609
10. Sustavov O. A. 1988, Recrystallization of vein quartz during the formation of cleavage in metapsammites of the Kular region (Yakutia). *Izvestiya vuzov. Geologiya i razvedka* [News of Universities. Geology and Exploration], no. 10, pp. 33–39. (*In Russ*.)
11. Parfenov L. M., Oksman V. S., Prokopyev A. V., Timofeev V. F., Tretyakov F. F., Trunilina V. A., Deykunenko A. V. 2001, Collage of terranes of the Verkhoyansk-Kolyma orogenic region. Tectonics, geodynamics and metallogeny of the territory of the Republic of Sakha (Yakutia). Moscow, pp. 199–254. (*In Russ*.)
12. Sustavov O. A. 2021, Cleavage microstructures and extension indicators in black shale rocks of the northern part of the Ulakhan-Sis antiform (Kularsky region, Yakutia). *Prirodnyye resursy Arktiki i Subarktiki* [Natural resources of the Arctic and Subarctic], vol. 26, no. 3, pp. 31–42. (*In Russ*.) https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-3-31-42
13. Sustavov O. A. 1998, Cleavage and recrystallization of quartz in terrigenous rocks of the Verkhoyansk complex (Yano-Indigirka zone). *Izvestiya Ural'skoy gosudarstvennoy gorno geologicheskoy akademii* [News of the Ural State Mining and Geological Academy], issue 8, pp. 49–55. (*In Russ*.)
14. Ramsay J. G., Huber M. I. 1987, The Techniques of Modern Structural Geology. Vol. 2. Folds and Fractures. London, 700 p.
15. Urai J. L., Spaeth G., van der Zee W., Hilgers C. 2001, Evolution of Mullion (formerly boudin) structures in the Variscan of the Ardennes and Eifel. *Journal of the Virtual Explorer*, vol. 3, pp. 1–16. https://doi.org/10.3809/JVIRTEX.2001.00027
16. Hirth G., Tullis J. 1992, Dislocation creep regimes in quartz aggregates. *Journal of Structural Geology*, vol. 14, issue 2, pp. 145–159. https://doi.org/10.1016/0191-8141(92)90053-Y
17. Law R. D. 1986, Relationship between strain and quartz crystallographic fabrics in the Roche Maurice quartzites of Plougastel, western Brittany. *Journal of Structural Geology*, vol. 8, issue 5, pp. 493–515. https://doi.org/10.1016/0191-8141(86)90001-5
18. Ferill D. A., Smart K. J., Cawood A. J., Morris A. P. 2021, The fold-thrust belt stress cycle: Superposition of normal, strike-slip, and thrust faulting deformation regimes. *Journal of Structural Geology*, vol. 148, article number 104362. https://doi.org/10.1016/j.jsg.2021.104362
19. Chen C.-T., Chan Yu. C., Lo C. H., Malavieille J., Lu C. Yu., Tang J. T., Lee Yu. H. 2018, Basal accretion, a major mechanism for mountain building in Taiwan revealed in rock thermal history. *Journal of Asian Earth Sciences*, vol. 152, pp. 80–90. https:// doi.org/10.1016/j.jseaes.2017.11.030
20. Law R. D., Casey M., Knipe R. J. 1986, Kinematic and tectonic significance of microstructures and crystallographic fabrics within quartz mylonites from the Assynt and Eriboll regions of the Moine thrust zone, NW Scotland. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh. Earth sciences*, vol. 77, issue 2, pp. 99–125. https://doi.org/10.1017/S0263593300010774
21. Lister G. S. 1984, Mylonites. *Journal of Structural Geology*, vol. 6, issue 6, pp. 617–638. https://doi.org/10.1016/0191-8141(84)90001-4
22. Behr W. M., Platt J. P. 2011, A naturally constrained stress profile through the middle crust in an extensional terrane. *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 303, issue 3–4, pp. 181–192. http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2010.11.044
23. Lloyd G. E., Freeman B. 1994, Dynamic recrystallization of quartz under greenschist conditions. *Journal of Structural Geology*, vol. 16, issue 6, pp. 867–881. https://doi.org/10.1016/0191-8141(94)90151-1
24. Bestmann M., Pennacchioni G., Nielsen S., Göken M., de Wall H. 2012, Deformation and ultrafine dynamic recrystallization of quartz in pseudotachylyte-bearing brittle faults: A matter of a few seconds. *Journal of Structural Geology*, vol. 38, pp. 21–38. http://dx.doi.org/10.1016/j.jsg.2011.10.001
25. Stipp M., Tullis J., Scherwath M., Behrmann J. H. 2010, A new perspective on paleopiezometry: Dynamically recrystallized grain size distributions indicate mechanism changes. *Geology*, vol. 38, no. 8, pp. 759–762. https://doi.org/10.1130/G31162.1
26. Mancktelow N. S., Pennacchioni G. 2004, The influence of grain boundary fluids on the microstructure of quartz-feldspar mylonites. *Journal of Structural Geology*, vol. 26, issue 1, pp. 47–69. https://doi.org/10.1016/S0191-8141(03)00081-6
27. Heilbronner R., Kilian R. 2017, The grain size(s) of Black Hills Quartzite deformed in the dislocation creep regime. *Solid Earth*, vol. 8, issue 5, pp. 1071–1093. http://dx.doi.org/10.5194/se-8-1071-2017
28. Tullis J. 2002, Deformation of Granitic Rocks: Experimental Studies and Natural Examples. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, vol. 51, no. 1, pp. 51–95. https://doi.org/10.2138/GSRMG.51.1.51
29. Krenn K., Fritz H., Mogessie A., Schaflechner J. 2007, Late Cretaceous exhumation history of an extensional extruding wedge (Graz Paleozoic Nappe Complex, Austria). *International Journal of Earth Sciences*, vol. 97, issue 6, pp. 1331–1352. https://doi.org/10.1007/s00531-007-0221-z

The article was received on November 26, 2023

УДК 535.651:535.243 http://doi.org/10.21440/2307-2091-2024-1-84-96

Применение спектроскопических методов для изучения и объяснения эффекта Усамбара

Роман Николаевич ЗУБОВ[1*]
Александр Юрьевич КИСИН[2,3**]

[1]АО «Региональный фонд», Уфа, Республика Башкортостан, Россия
[2]Институт геологии и геохимии им. акад. А. Н. Заварицкого УрО РАН, Екатеринбург, Россия
[3]Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия

Аннотация

Актуальность работы обусловлена тем, что описание и оценка цветовых характеристик ювелирных камней до сих пор основываются на различных колориметрических моделях, которые не отражают оптические явления, зависящие от конкретных физических свойств и химического состава камней.

Цель работы. Данная статья является попыткой решить проблему связи цвета и оптических свойств ювелирного камня и оценить с этих позиций эффект Усамбара, впервые обнаруженный в Cr-содержащих турмалинах.

Методология исследования – проведение химического анализа образцов Cr-содержащих турмалинов на электронно-зондовом микроанализаторе в ЦКП «Геоаналитик», определение коэффициентов поглощения для разных диапазонов длин волн на основе обработки данных спектров пропускания Cr-содержащих турмалинов; составление уравнений относительного светового потока $F(\lambda)$ с аппроксимацией части функций полиномами второго порядка отдельно для зеленого и красного диапазонов спектра; численное исследование уравнений относительного светового потока в зеленом и красном диапазонах спектра для различных толщин образцов.

Результаты. Образцы с высоким содержанием хрома, обладающие выраженным эффектом Усамбара, имеют высокие показатели поглощения в зоне хромоформа α_{Cr}. Исследование уравнения относительного светового потока $F(\lambda)$ с учетом характеристик источника света, спектра пропускания видимого света камня и спектральной чувствительности человеческого глаза позволило точно предсказать «цветовое поведение» Cr-содержащих турмалинов для различных размеров ювелирных камней.

Заключение. Показано значительное влияние разности коэффициентов поглощения света в середине полосы поглощения хромофора и в зеленом и красном диапазоне спектра на проявление эффекта Усамбара. Авторы надеются, что развитие предложенного метода даст более аргументированное объяснение различным оптическим явлениям в ювелирных камнях.

Ключевые слова: эффект Усамбара, Cr-содержащий турмалин, спектр пропускания, спектр поглощения, коэффициент поглощения света, геометрическая длина светового пути.

Введение

Многие ювелирные камни привлекают нас различными уникальными оптическими эффектами: эффекты авантюризации, астеризма и кошачьего глаза, иризации, опалесценции, александритовый эффект и др. Эффект изменения цвета в зависимости от толщины прозрачного цветного камня, т. е. геометрической длины пути световых лучей (так называемый эффект Усамбара), впервые обнаруженный для Cr-содержащего турмалина [1], еще до конца не изучен. Например, отмечено усиление красных оттенков (и ослабление зеленых оттенков соответственно) у образцов синтетического александрита с увеличением размера [2]. Эффект Усамбара был описан и для крупных, меняющих цвет гранатов [3, 4].

Цвет ювелирного камня, воспринимаемый человеком, представляет собой сложную комбинацию физических явлений, основными из которых являются:

I. Спектральный состав источника света, которым может быть дневной свет, лампы накаливания различных типов, люминесцентные лампы, а также большое количество светодиодных источников света;

II. Кристаллическая структура ювелирных камней с присутствием в ней хромофорных элементов, определяющих цвет камней;

III. Спектральная чувствительность человеческого глаза, который воспринимает желто-зеленый (555 нм) на 100 % в узкой видимой части спектра (380–780 нм), тогда как свет с длиной волны 470 нм воспринимается всего на 9 %, а 650 нм – на 11 % от реальной интенсивности [5].

Большинство исследователей, изучавших эффект Усамбара спектральными методами, указывали перечисленные факторы как наиболее важные, но для характе-

✉zrmine@mail.ru
** kissin@igg.uran.ru

ристики цвета использовали либо колориметрическую таблицу CIE 1931 [6], либо колориметрическую круговую таблицу CIELAB 1976 [7]. В последние годы спектральные характеристики ювелирных камней в сочетании с законами поглощения света Бугера–Бера–Ламберта все чаще используются для описания цветов ювелирных камней [8] как для объяснения эффекта «сложения цветов» [9], так и для создания различных оттенков цвета с помощью элементов-хромофоров [10]. Поэтому попробуем объединить и проанализировать в одном математическом уравнении все основные факторы (I–III), перечисленные ранее, которые описывают определенную часть (зеленую или красную) спектра. Как было показано, спектры поглощения и пропускания ювелирных камней позволяют численно оценить характеристики светлоты [11] и насыщенности цвета камня [12], не прибегая к колориметрическим моделям.

Изучая спектр поглощения [11], мы видим, что цвет камня в целом соответствует диапазону длин волн с минимальным поглощением λ_{min}. Основной элемент-хромофор формирует зону поглощения остальных цветовых длин волн с максимумом при λ_{max}. Чем больше максимум поглощения, тем темнее кажется камень человеческому глазу. Важно изучить относительную высоту максимума поглощения:

$$A_{max} - A_{min} = -\log T_{\lambda max} + \log T_{\lambda min} = \log(\exp(-\alpha_{(\lambda min)} t)) - \log(\exp(-\alpha_{(\lambda max)} t)) = \alpha_{\lambda max} t \log e - \alpha_{\lambda min} t \log e = (\alpha_{\lambda max} - \alpha_{\lambda min}) t \log e = \Delta\alpha t \log e, \quad (1)$$

где величина

$$\Delta\alpha = \alpha_{\lambda max} - \alpha_{\lambda min} \quad (2)$$

позволяет оценить степень светлоты камня.

Для понимания насыщенности цвета удобнее изучать спектры пропускания [12]. Рассмотрим спектр пропускания (рис. 1) двух образцов турмалинов разной насыщенности (рис. 2).

Фрагменты спектра пропускания удобно аппроксимировать кривыми 2-го порядка. Тогда уравнения будут иметь вид $T(\lambda) = a\lambda^2 + b\lambda + c$, где (рис. 1):

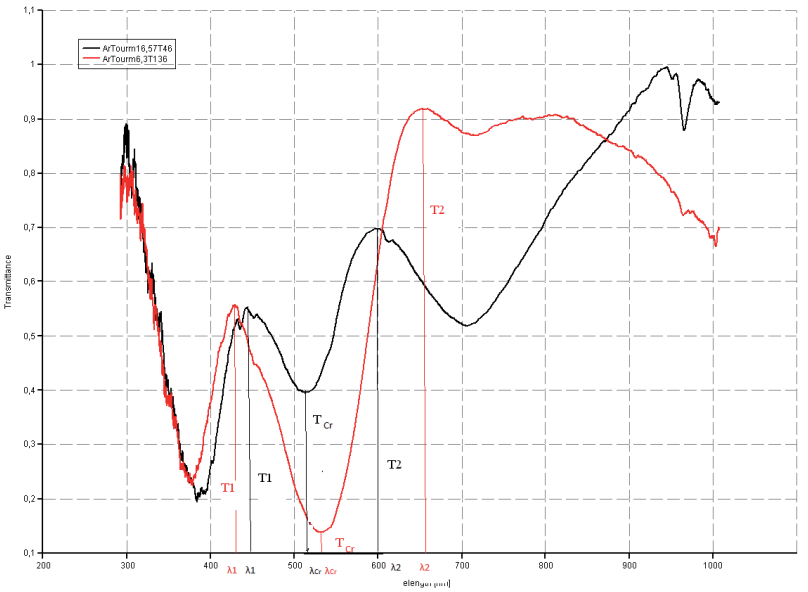


Рисунок 1. Спектры пропускания турмалинов 16,6 (черный) и 6,3 (красный) карат
Figure 1. Transmission spectra of 16,6 (black) and 6,3 (red) carat tourmalines

Рисунок 2. Насыщенность цвета турмалинов 16,6 и 6,3 карат
Figure 2. Color saturation of 16,6 and 6,3 carat tourmalines

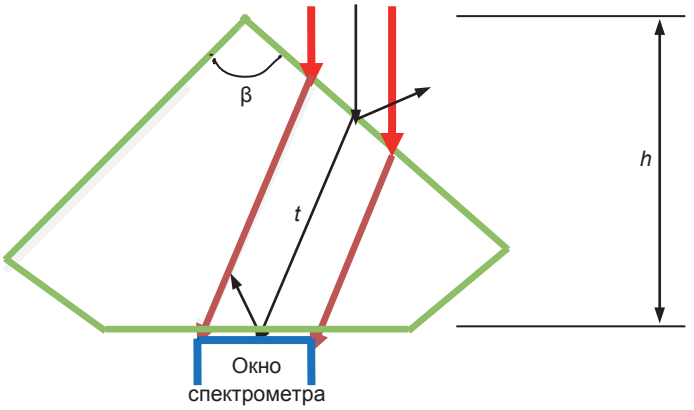


Рисунок 3. Траектория светового луча на пути *t* с отражениями от двух поверхностей
Figure 3. Trajectory of a light beam on the path t with reflections from two surfaces

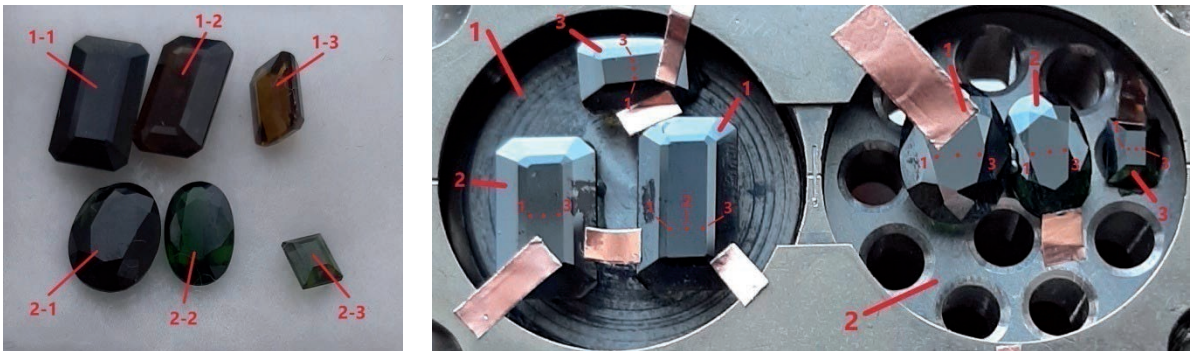


Рисунок 4. Определение химического состава образцов на электронно-зондовом микроанализаторе
Figure 4. Determination of chemical composition of samples on electron-probe microanalyzer

$$a = -(T_i - T_{Cr})/(\lambda_{Cr} - \lambda_i)^2;\ b = 2\lambda_i(T_i - T_{Cr})/(\lambda_{Cr} - \lambda_i)^2;$$
$$c = T_i - \lambda_i^2(T_i - T_{Cr})/(\lambda_{Cr} - \lambda_i)^2; \quad (3)$$

$$H_i = -a_i = (T_i - T_{Cr})/(\lambda_{Cr} - \lambda_i)^2. \quad (4)$$

Здесь T_i, T_{Cr} – относительные величины светопропускания (от 0 до 1) в *i*-й части спектра и зоне хромофора; λ_i, λ_{Cr} – длина волны в *i*-й части спектра и зоне хромофора, нм.

Чем больше числитель (светопропускание) и чем меньше знаменатель (диапазон длин волн) выражения (4), тем ярче и чище будет видимый цветовой тон, тем более узкой и высокой будет кривая спектра пропускания. Таким образом, значение H_i можно рассматривать как критерий насыщенности цвета.

Материалы и методы исследования

Как правило, геммологические исследования проводятся для ограненных камней со случайным положением оптической оси. Поэтому цветовые характеристики камней (светлота и насыщенность), спектры поглощения и пропускания имеют определенный разброс значений из-за случайного положения оптической оси и различных видов огранки. Измерения также показали влияние трещин и включений, которые уменьшают светопропускание и увеличивают показатель поглощения света. Результаты, приведенные в табл. 3, 4, являются средним значением четырех измерений при повороте каждого образца на 0–90–180–270 градусов на площадке спектрометра GlGem Канадского геммологического института в направлении, перпендикулярном к площадке ювелирного камня (рис. 3). Линейные и угловые характеристики определялись микрометром МК 0–25 мм и универсальным гониометром МКМВ с верньером 0°05′. Для определения геометрической длины светового пути *t*, мм, в образце использовалась приближенная формула, полученная для параллельных световых пучков (рис. 3):

$$t = [h(c^2(c-1) + (n^2(1-c^2) + 2c^3(c-1))^{1/2})]/[n - c^3(2-c)/n], \quad (5)$$

где *h* – высота камня от калеты или шипа до площадки, мм; *c* – косинус половины угла между главными гранями павильона, $c = \cos(\beta/2)$; *n* – показатель преломления ювелирного камня.

Для расчета показателя поглощения α использовалась модифицированная формула для случаев малого и большого поглощения света образцом [13], учитывающая коэффициент отражения света *R* в трех физических средах: воздух–камень–воздух:

$$T = I/I_0 = [(1-R)^2\exp(-\alpha t)]/[(1 - R^2\exp(-2\alpha t)], \quad (6)$$

$$R = (n-1)^2/(n+1)^2, \quad (7)$$

где *I* – интенсивность света, прошедшего камень; I_0 – интенсивность света на входе в камень.

Откуда

$$\alpha = (1/t)\ln[(2TR^2)/(((1-R)^4 + 4T^2R^2)^{1/2} - (1-R)^2)]. \quad (8)$$

Таблица 1. Стандартные геммологические свойства образцов
Table 1. Standard gemological properties of samples

Номер образца	Вес, карат	Цвет	Размеры, мм	Плотность, г/см³	Показатель преломления	Двупреломление	Дихроизм	Флюоресценция при 254 нм
1-1	3,23	Желто-зеленый	12,4 × 7,0 × 4,0	3,08	1,640–1,620	0,020	Зеленый–коричневый	Слабая оранжевая
1-2	3,03	Зеленовато-коричневый	11,4 × 6,8 × 4,5	3,07	1,640–1,620	0,020	Темно-светло-коричневый	Слабая оранжевая
1-3	1,31	Зеленовато-коричневый	7,6 × 5,5 × 3,6	3,11	1,640–1,620	0,020	Желто-зеленый–коричневый	Слабая оранжевая
2-1	2,55	Хромово-зеленый	10,1 × 7,7 × 5,1	3,15	1,650–1,630	0,020	Желто-зеленый–зеленый	Слабая оранжевая
2-2	1,34	Хромово-зеленый	9,3 × 6,0 × 3,5	3,22	1,632–1,613	0,019	Желто-зеленый–зеленый	Инертен
2-3	0,45	Желто-зеленый	4,8 × 3,7 × 3,1	3,10	1,639–1,618	0,021	Желто-зеленый–зеленый	Слабая оранжевая

Таблица 2. Средний состав образцов, мас. %
Table 2. Average composition of samples, wt. %

Номер образца	Na	Mg	F	K	Ca	V	Cr
1-1	1,24	6,35	0,15	0,10	1,63	0,09	0,14
1-2	1,25	6,44	0,18	0,08	1,59	0,05	0,09
1-3	1,19	6,70	0,15	0,09	1,79	0,07	0,06
2-1	0,93	6,80	0,30	0,09	2,14	0,01	0,30
2-2	0,94	8,30	1,47	0,05	2,41	0,29	0,10
2-3	1,27	6,68	0,24	0,11	1,58	0,05	0,13
Номер образца	Ti	Fe	B	Al	Si	O	Общее
1-1	0,52	0,06	2,51	17,69	17,21	46,70	94,40
1-2	0,45	0,07	2,87	17,55	17,09	47,18	94,90
1-3	0,51	0,04	2,95	17,67	17,28	47,93	96,43
2-1	0,80	0,01	3,06	16,81	16,72	47,17	95,14
2-2	0,46	0,01	2,85	14,73	17,17	46,24	95,01
2-3	0,49	0,04	2,34	17,29	17,18	46,07	93,46

Как было показано ранее [11], величина α*t* является характеристикой светлоты камня и косвенно учитывает концентрацию хромофора (Cr_2O_3 в рубине, изумруде, жадеите и т. д.), которая изменяется пропорционально светлоте и величине показателя преломления, однако отмечаются исключения [14].

Кроме того, мы определили стандартные геммологические свойства образцов (табл. 1), а также провели электронно-зондовый микроанализ для определения концентрации хромофора в образцах и его влияния на эффект Усамбара. Все образцы были инертны к ультрафиолетовому излучению 365 нм. Определение химического состава образцов выполнено на электронно-зондовом микроанализаторе Cameca SX100 в ЦКП «Геоаналитик» Института геологии и геохимии УрО РАН (рис. 4). Анализ проводился при ускоряющем напряжении 15 кВ и токе электронного зонда 20 нА с использованием кристалл-анализаторов TAP, LPC0, PC2, LPET, PET, LLIF, LIF. Время накопления импульсов в максимуме пика составило 10 с. При проведении ЭЗМА в качестве стандартов использовались: апатит (P), хлорапатит (Cl), фтор-флогопит (F), датолит (B), жадеит (Na), диопсид (Mg, Ca, Si), ортоклаз (K), родонит (Mn), Al_2O_3 (Al), TiO_2 (Ti), Fe_2O_3 (Fe), Cr_2O_3 (Cr), V_2O_5 (V), ZnS (Zn). Пределы обнаружения составили, мас. %: Na, Mg, P, Cl, K, Ca, Al, Si – 0,02–0,03, Fe, Ti, V, Cr, Mn – 0,07–0,08, F, Zn – 0,1–0,12, B – 1,4.

Содержание таких примесных элементов, как P, Cl, Mn, Zn, – ниже предела обнаружения анализа. Все образцы, кроме одного, имеют промежуточный химический состав типа дравита и увита. Образец 2-2 относится к фторсодержащему виду данных типов классификации турмалина. При расчете коэффициентов содержания были нормированы на кремний. Усредненный состав образцов приведен в табл. 2.

Поскольку эффект Усамбара впервые был обнаружен на образцах Cr-содержащего турмалина, мы исследуем

Таблица 3. Результаты обработки спектров пропускания (рис. 6, 7; рис. 12, 13) Cr-содержащих турмалинов
Table 3. Results of processing of transmission spectra (Fig. 6, 7; Fig. 12, 13) of Cr-containing tourmalines

Номер образца	Вес, карат	Высота, мм	Уголβ/2, град	Длина светового пути *t*, мм	λ_g, нм	T_g	α_g, мм$^{-1}$	l_{Cr}, нм	T_{Cr}	α_{Cr}, мм$^{-1}$	λ_r, нм	T_r	α_r, мм$^{-1}$	Эффект Усамбара
Хромовые турмалины одного месторождения, Мозамбик														
1-1	3,23	4,08	52	3,16	543	0,099	0,697	602	0,050	0,920	843	0,877	0,005	Есть
1-2	3,03	4,45	44	3,20	563	0,216	0,443	601	0,199	0,468	840	0,976	0,000	Нет
1-3	1,31	3,63	43	3,05	548	0,303	0,353	600	0,273	0,387	872	0,564	0,150	Нет
Хромовые турмалины других месторождений (Мозамбик, Восточная Африка, Урал)														
2-1	2,55	5,12	45	3,46	526	0,198	0,434	600	0,033	0,962	855	0,977	0,000	Есть
2-2	1,34	3,45	49	2,59	523	0,122	0,768	610	0,021	0,479	860	0,290	0,432	Нет
2-3	0,45	3,15	39	1,93	526	0,324	0,523	604	0,176	0,840	845	0,578	0,223	Нет

его образцы с получением оптических характеристик, которые приведены в табл. 3. В ней приведены показатели поглощения света α в зеленом диапазоне – α_g, красном диапазоне – α_r и зоне хромофора – α_{Cr}, рассчитанные по формуле (8), а также относительная величина светопропускания T_g, T_r, T_{Cr} в соответствующих диапазонах длин волн λ.

Основные расчетные уравнения

Для того чтобы перейти от спектральных данных к изображению, воспринимаемому человеческим глазом, необходимо учитывать спектральную характеристику источника света (в данном случае галогенной лампы) и спектральную чувствительность человеческого глаза. Таким образом, мы предполагаем, что относительная величина светового потока, прошедшего камень в видимой части спектра, может быть выражена общей формулой:

$$F(\lambda) = \int_{380}^{780} D(\lambda)T(\lambda)V(\lambda)d\lambda, \quad (9)$$

где $F(\lambda)$ – относительная величина светового потока; $D(\lambda)$ – относительное спектральное распределение световой энергии источника света; $T(\lambda)$ – спектр пропускания камня, определяемый спектрометром и выраженный в виде функции; $V(\lambda)$ – спектральная чувствительность человеческого глаза в виде функции от λ.

Очень трудно получить явное математическое решение для функции (9), если вообще возможно, поэтому мы разобьем спектр на несколько диапазонов. Нас интересует передаваемый световой поток в зеленой и красной частях спектра. Мы можем аппроксимировать функции $D(\lambda)$, $T(\lambda)$, $V(\lambda)$ многочленами первой и второй степени и получить искомое решение.

Рассмотрим каждую из этих функций отдельно. Спектральное распределение световой энергии галогенной лампы характеризуется преобладанием красных световых лучей. Для лампы спектрометра мощностью 10 Вт точные характеристики даются выражениями для световой энергии $D(\lambda) = 1{,}01\lambda - 0{,}429$ для зеленой и $D(\lambda) = 0{,}93\lambda - 0{,}381$ для красных спектральных полос. Эти выражения почти полностью совпадают с общей характеристикой для галогенных ламп в виде

$$D(\lambda) = 2{,}5\lambda - 1. \quad (10)$$

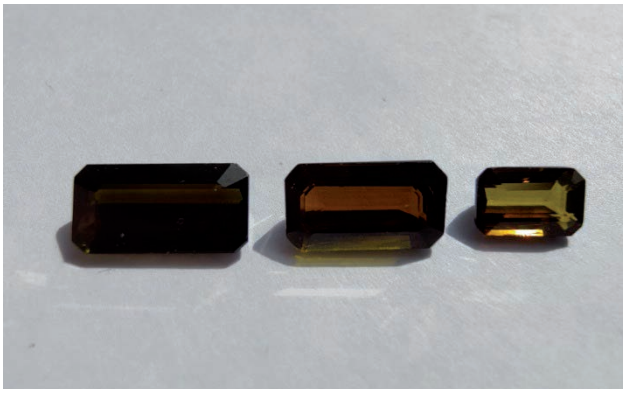


Рисунок 5. Образцы 1-1,1-2,1-3 слева направо при солнечном освещении
Figure 5. Samples 1-1, 1-2, 1-3 from left to right in sunlight

Функция $T(\lambda)$, как было показано ранее [12], может быть аппроксимирована параболой вида $a\lambda^2 + b\lambda + c$, а в соответствии с выражениями (3) и (4) имеем:

$$T(\lambda) = -H_i\lambda^2 + 2\lambda_i H_i\lambda + (T_i - H_i\lambda_i^2), \quad (11)$$

где H_i – критерий насыщенности цвета *i*-й части спектра; T_i – максимальное значение пропускания в *i*-й части спектра; λ_i – длина волны, соответствующая максимальному значению пропускания *i*-й части спектра.

Для спектральной чувствительности человеческого глаза существуют аппроксимации в виде колоколообразной функции, функции $\cos^2$ или функции Гаусса:

$$V(\lambda) = \exp[-((\lambda - 0{,}559)/0{,}06)^2]. \quad (12)$$

Но удобнее для функции $V(\lambda)$ использовать фрагменты квадратной параболы в зеленой и красной частях спектра, построенных по точкам в соответствии с приложением ДБ ГОСТ Р ИСО 24502-2012 [15] в виде:

– для зеленого диапазона 510–560 nm:

$$V_g(\lambda) = -264{,}1072\,\lambda^2 + 292{,}3290\,\lambda - 79{,}8884, \quad (13)$$

– для красного диапазона 620–700 nm:

$$V_r(\lambda) = 81{,}9935\lambda^2 - 112{,}6798\,\lambda + 38{,}7143. \quad (14)$$

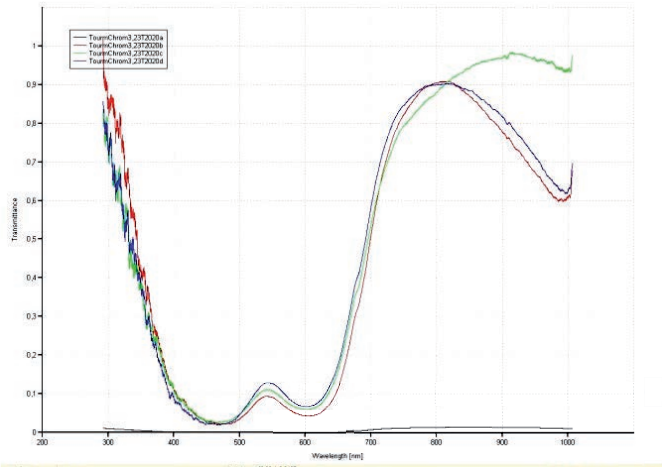


Рисунок 6. Спектр пропускания Cr-содержащего турмалина, образец 1-1
Figure 6. Transmission spectrum of Cr-containing tourmaline, sample 1-1

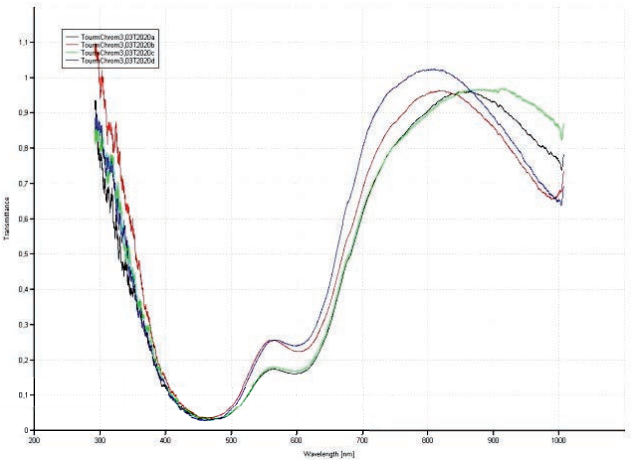


Рисунок 7. Спектр пропускания Cr-содержащего турмалина, образец 1-2
Figure 7. Transmission spectrum of Cr-containing tourmaline, sample 1-2

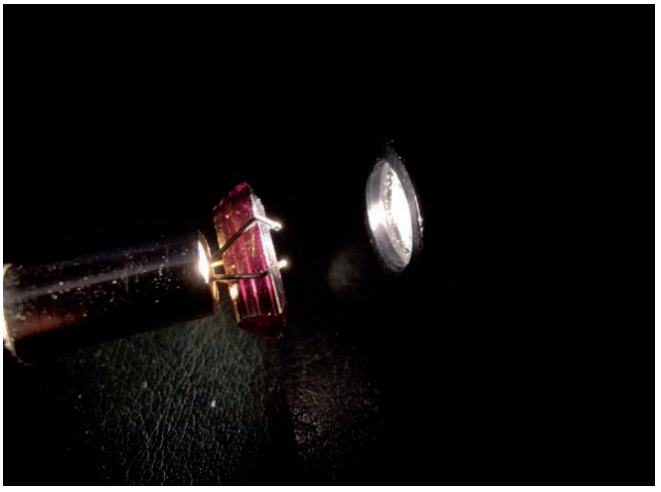


Рисунок 8. Эффект Усамбара в образце 1-1
Figure 8. Usambara effect in sample 1-1

Подставляя в выражение (9) выбранные функции (10), (11) и (13), (14), численные значения пределов интегрирования λ (380 и 780 нм) и среднее λ_{Cr} = 601 нм, после упрощений получаем для соответствующих диапазонов:

– для зеленого цвета: $F_g = 0{,}034123T_{Cr} - 0{,}019390T_g$, (15)

– для красного цвета: $F_r = 0{,}004506T_{Cr} + 0{,}000536T_r$, (16)

где значения светопропускания в зеленой T_g, красной T_r частях спектра, зоне хромофора T_{Cr} связаны с толщиной образца (длиной оптического пути) t и коэффициентом поглощения α_i по закону Бугера–Бера–Ламберта:

$$T_i = \exp(-\alpha_i t). \quad (17)$$

Преобразуя выражение (15), используя (17), получим условие исчезновения ($F = 0$) зеленой окраски для образцов 1-1,1-2, 1-3 Cr-содержащих турмалинов при длине оптического пути t ($\alpha_{Cr} \neq \alpha_g$):

$$t = 0{,}5652/(\alpha_{Cr} - \alpha_g). \quad (18)$$

Выражение (18) показывает основную роль разности между коэффициентом поглощения света в зоне хромофора α_{Cr} и коэффициентом поглощения света в зеленой зоне α_g для более раннего проявления эффекта Усамбара. Чем больше эта разница, тем меньше толщина, при которой проявляется эффект.

Основные результаты исследования и их обсуждение

I. Первая группа образцов 1-1, 1-2, 1-3 включает Cr-содержащие турмалины из Мозамбика, имеющие ненасыщенный зеленый цвет и сильный дихроизм (рис. 5). На рис. 6, 7 представлены спектры пропускания образцов 1-1 и 1-2 соответственно, имеющие близкие размеры, но сильно отличающиеся по величине α_{Cr} и разности ($\alpha_{Cr} - \alpha_g$). Рис. 8 демонстрирует эффект Усамбара в образце 1-1 с наибольшей разностью ($\alpha_{Cr} - \alpha_g$), в то время как на рис. 9, 10 для образцов 1-2 и 1-3 мы не видим красного цвета, только оранжево-желтое окрашивание.

Мы можем численно исследовать, как изменяется относительная величина светового потока зеленого и красного цветов в соответствии с выражениями (15) и (16) при увеличении толщины образца (геометрической длины пути t). В данном расчете мы использовали коэффициенты поглощения α_i, которые взяты из табл. 3, полученные данные сведены в табл. 4.

II. Вторая группа Cr-содержащих турмалинов 2-1, 2-2, 2-3 представлена образцами из различных месторождений, некоторые из которых (2-2) имеют насыщенный («хромовый») зеленый цвет (рис. 11). Как видно из табл. 3, коэффициенты поглощения света α_{Cr} этих образцов выше, но эффект Усамбара отчетливо проявляется только в образце 2-1. На рис. 12, 13 приведены спектры пропускания образцов 2-1 и 2-2, коэффициенты поглощения света α_{Cr} которых существенно отличаются (табл. 3).

В табл. 5 приведены относительные величины световых потоков $F(\lambda)$ для образцов Cr-содержащего турмалина 2-1, 2-2, 2-3 других месторождений, формулы для которых будут аналогичны выражениям (15) и (16):

– для зеленого цвета: $F_g = 0{,}010623T_{Cr} + 0{,}004110T_g$, (19)

Таблица 4. Численное исследование уравнений относительной величины светового потока для образцов № 1-1, 1-2, 1-3
Table 4. Numerical study of the equations of relative luminous flux magnitude for samples № 1-1, 1-2, 1-3

F(λ)	Геометрическая длина светового пути *t*, мм									
				Образец № 1-1, h = 4,08 мм						
F_g	0,394	0,061	0	0	0	0	0	0	0	0
F_r	0,233	0,124	0,081	0,064	0,057	0,054	0,052	0,052	0,051	0,051
				Образец № 1-2, h = 4,45 мм						
F_g	0,891	0,539	0,325	0,195	0,117	0,070	0,042	0,025	0,015	0,009
F_r	0,336	0,230	0,164	0,123	0,097	0,081	0,071	0,064	0,060	0,058
				Образец № 1-3, h = 3,63 мм						
F_g	0,955	0,598	0,376	0,234	0,144	0,087	0,052	0,030	0,016	0,008
F_r	0,352	0,247	0,175	0,125	0,090	0,066	0,049	0,036	0,028	0,021

Примечание: ячейки табл. 4 окрашены в желтый цвет, когда красный цвет (F_r) начинает преобладать над зеленым (F_g).

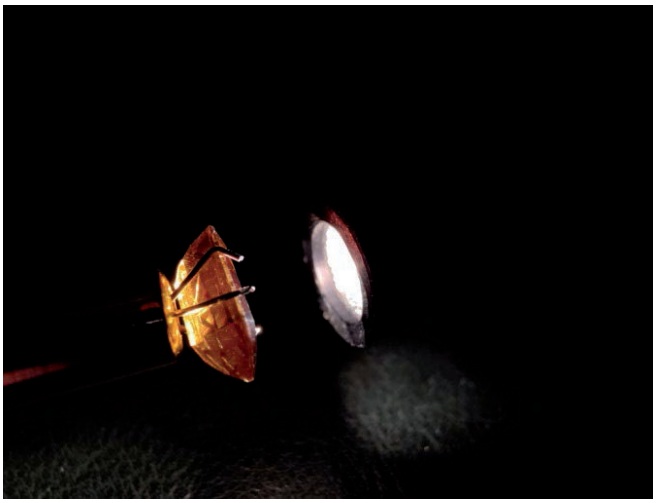


Рисунок 9. Оранжево-желтое окрашивание в образце 1-2
Figure 9. Orange-yellow staining in sample 1-2

Рисунок 10. Оранжево-желтое окрашивание в образце 1-3
Figure 10. Orange-yellow staining in sample 1-3

– для красного цвета: $F_r = 0{,}004652T_{Cr} + 0{,}000390T_r$. (20)

Полученные выражения несколько отличаются от выражений (15) и (16). Численное исследование уравнений (19) и (20) показывает, что их первое слагаемое в 10 и более раз меньше второго слагаемого при длине геометрического пути t более 5 мм и $\alpha_{Cr} = 0{,}9–1{,}0$. Тогда, пренебрегая первыми слагаемыми, можно получить выражение длины геометрического пути t, при которой световые потоки зеленого и красного лучей уравниваются ($F_g = F_r$):

$$t = 2{,}355 / (\alpha_g - \alpha_r). \quad (21)$$

Полученное выражение (21) является частным случаем численного исследования, примененного к конкретным образцам 2-1, 2-2, 2-3, и одной из иллюстраций эффекта Усамбара ввиду сложности полного исследования выражения (9). Выражение (21) согласуется с (18) в части важной роли разности между коэффициентами поглощения (в данном случае – в зеленом и красном диапазоне) для эффекта Усамбара.

Образец 2-1 демонстрирует сильный эффект Усамбара (рис. 14). В образце 2-2 (рис. 15) никаких изменений цвета не происходит, в образце 2-3 происходит слабое желтое окрашивание (рис. 16).

Рисунок 11. Образцы 2-1,2-2,2-3 слева направо при солнечном освещении
Figure 11. Samples 2-1,2-2,2-3 from left to right in sunlight

Способность изоморфного замещения атомов алюминия на атомы хрома в кристаллической структуре при образовании минералов [16] обуславливает особое положение хрома среди других хромофоров. Существует

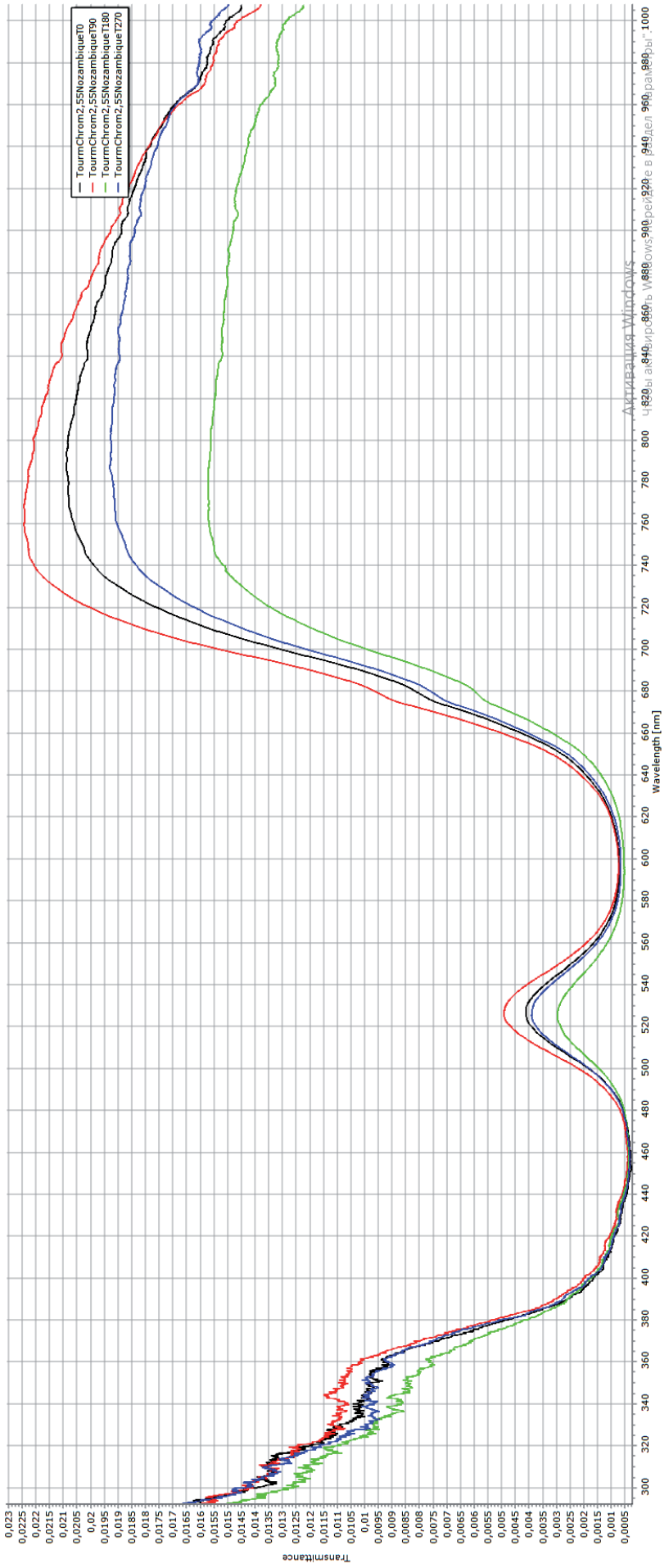


Рисунок 12. Спектр пропускания Cr-содержащего турмалина, образец 2-1
Figure 12. Transmission spectrum of Cr-containing tourmaline, sample 2-1

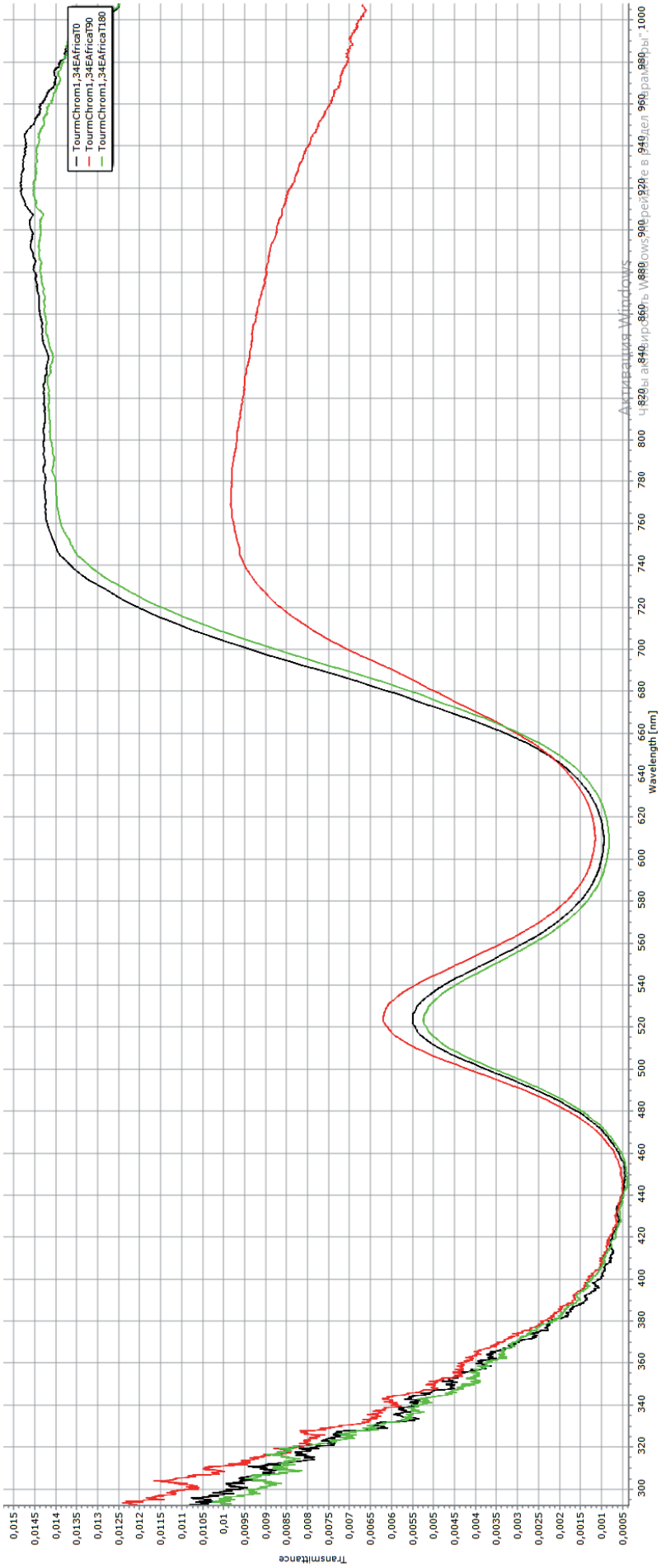


Рисунок 13. Спектр пропускания Cr-содержащего турмалина, образец 2-2
Figure 13. Transmission spectrum of Cr-containing tourmaline, sample 2-2

множество зеленых драгоценных камней (изумруд, демантоид, цаворит, жадеит, сфен, хромдиопсид и др.), для которых эффект Усамбара еще подробно не изучен, хотя появление желто-оранжевой окраски в демантоиде, сфене (к УФ-лучам в цаворите) неоднократно наблюдалось. Есть упоминание об эффекте Усамбара в хромсодержащих корнерупине и эпидоте [1]. Внимание исследователей этого эффекта привлекают также александрит [17, 18] и меняющий цвет гранат [3, 4]. Очевидно, что проявление эффекта Усамбара зависит от наличия в спектре минерала полосы поглощения между зеленым и красным диапазонами. А степень проявления эффекта будет зависеть как от геометрии (толщины) образца, так и соотношения между коэффициентами поглощения в этих спектральных диапазонах.

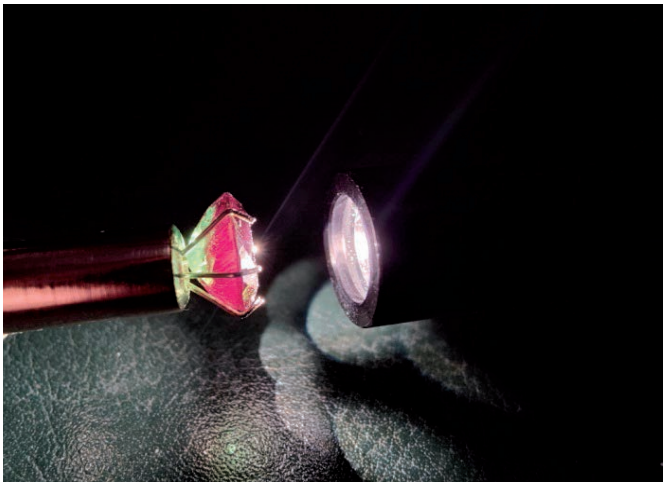


Рисунок 14. Сильный эффект Усамбара в образце 2-1
Figure 14. Strong Usambara effect in sample 2-1

В нашем исследовании мы использовали «усредненные» характеристики спектров для ограненных ювелирных камней без учета положения оптической оси кристаллов турмалина. Кроме того, коэффициенты поглощения α_i зависят от показателя преломления. Поэтому более точные исследования могут выявить эффект Усамбара и в других минералах при максимальных значениях разности $(\alpha_{Cr} - \alpha_g)$ и минимальных коэффициентах поглощения света в красной области спектра α_r.

Выводы

1. Показана возможность количественной оценки цветовых эффектов ювелирных камней (в том числе эффекта Усамбара в Cr-содержащих турмалинах) на основе

Таблица 5. Численное исследование уравнений относительной величины светового потока для образцов № 2-1, 2-2, 2-3
Table 5. Numerical study of the equations of relative luminous flux magnitude for samples № 2-1, 2-2, 2-3

F(λ)	Геометрическая длина светового пути *t*, мм									
					Образец № 2-1, h = 5,12 мм					
F_g	**0,672**	**0,328**	**0,172**	**0,095**	**0,055**	**0,034**	0,021	0,013	0,008	0,005
F_r	0,217	0,107	0,065	0,049	0,043	**0,040**	**0,040**	**0,039**	**0,039**	**0,039**
					Образец № 2-2, h = 3,45 мм					
F_g	**0,849**	**0,496**	**0,294**	**0,175**	**0,106**	**0,064**	**0,039**	**0,024**	**0,015**	**0,009**
F_r	0,313	0,195	0,121	0,075	0,047	0,029	0,018	0,011	0,007	0,004
					Образец № 2-3, h = 3,15 мм					
F_g	**0,702**	**0,342**	**0,171**	**0,088**	**0,046**	**0,025**	0,013	0,007	0,004	0,002
F_r	0,232	0,112	0,057	0,032	0,020	0,013	**0,010**	**0,007**	**0,005**	**0,004**

Примечание: ячейки табл. 5 окрашены в желтый цвет, когда красный цвет (F_r) начинает преобладать над зеленым (F_g).

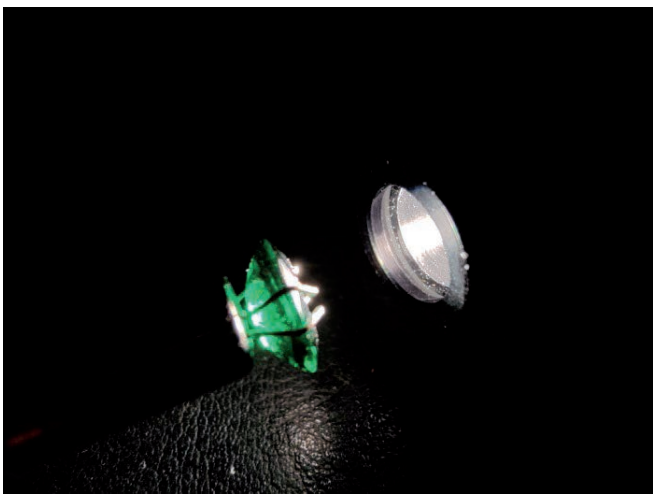


Рисунок 16. Слабое желтое окрашивание в образце 2-3
Figure 16. Faint yellow staining in sample 2-3

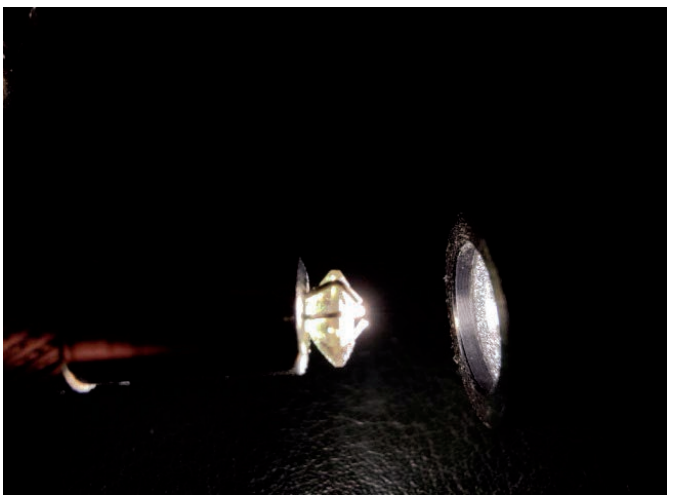


Рисунок 15. Отсутствие окрашивания в образце 2-2
Figure 15. Absence of staining in sample 2-2

предложенных функций, учитывающих характеристики источника света, спектра пропускания камня и спектральной чувствительности человеческого глаза.

2. Исчезновение зеленого цвета при изменении толщины камня происходит более интенсивно, если существует большая разница между коэффициентом поглощения света α_{Cr} в середине полосы поглощения хромофора и коэффициентом поглощения света α_g в зеленой области спектра.

3. Для более сильного проявления эффекта Усамбара (появления красного цвета) камень должен иметь высокий коэффициент поглощения света α_g в зеленой области спектра и минимальный коэффициент поглощения света α_r в красной области спектра.

Благодарности

Авторы хотели бы поблагодарить доктора Фридриха Менгеса (Dr. Friedrich Menges) – разработчика Spekwin32 & SpectraGryph, создателя Spectroscopy Ninja – за предоставление лицензии на стандартную версию Spectragryph для GlGem спектрометра Канадского геммологического института.

ЛИТЕРАТУРА

1. Halvorsen A. The Usambara effect and its interaction with other colour change phenomena // The Journal of Gemmology. 2006. Vol. 30. No. 1/2. P. 1–21. https://doi.org/10.15506/JOG.2006.30.1.1
2. Stone-Sundberg J. Challenges in orienting alexandrite: the Usambara and other optical effects in synthetic HOC-grown Russian alexandrite // Gems & Gemology. 2014. Vol. 50. No. 1. URL: https://www.gia.edu/gems-gemology/spring-2014-synthetic-alexandrite-stone-sundberg
3. Krzemnicki M. S., Hänni H. A., Reusser E. Colour-change garnets from Madagascar: comparison of colorimetric with chemical data // Journal of Gemmology. 2001. Vol. 27. No. 7. P. 395–408.
4. Krzemnicki M. S., Zhou W., Maizlan J. Colour-change effects in gemstones: causes and perception // 33id IGC. Hanoi, Vietnam. 2013. P. 110–113.
5. Ложкин Л. Д. Цвет, его измерение и восприятие // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2012. Т. 15. № 3. С. 110–122.
6. Taran M. N., Naumenko I. V. Usambara effect in tourmaline: optical spectroscopy and colourimetric studies // Mineralogical Magazine. 2016. Vol. 80. Issue 5. P. 705–717. https://doi.org/10.1180/minmag.2016.080.016
7. Sun Z., Palke A. C., Renfro N. Vanadium- and chromium-bearing pink pyrope garnet: characterization and quantitative colorimetric analysis // Gems & Gemology. 2015. Vol. 51. No. 4. P. 348–369. http://dx.doi.org/10.5741/GEMS.51.4.348
8. Lu R. Color origin of lavender jadeite: An alternative approach // Gems & Gemology. 2012. Vol. 48. No. 4. P. 273–283. http://dx.doi.org/10.5741/GEMS.48.4.273
9. Shen C., Lu R. The Color Origin of Gem Diaspore: Correlation to Corundum // Gems & Gemology. 2018. Vol. 54. No. 4. P. 394–403. http://dx.doi.org/10.5741/GEMS.54.2.394
10. Dubinsky E. V., Stone-Sundberg J., Emmett J. L. A Quantitative description of the causes of color in corundum // Gems & Gemology. 2020. Vol. 56. No. 1. P. 2–28. http://dx.doi.org/10.5741/GEMS.56.1.2
11. Зубов Р. Н. Количественная оценка цвета камней с аллохроматической окраской // Известия УГГУ. 2018. Вып. 4(52). С. 50–56. https://doi.org/10.21440/2307-2091-2018-4-50-56
12. Зубов Р. Н. Разработка критериев для определения насыщенности цвета ювелирных камней // Известия УГГУ. 2020. Вып. 1(57). С. 86–95. https://doi.org/10.21440/2307-2091-2020-1-86-95
13. Леликов Ю. С., Бочкарева Н. И., Горбунов Р. И., Мартынов И. А., Ребане Ю. Т., Тархин Д. В., Шретер Ю. Г. Измерение коэффициента поглощения света, распространяющегося латерально в светодиодных структурах с квантовыми ямами $In_{0.2}Ga_{0.8}N/GaN$ // Физика и техника полупроводников. 2008. Т. 42. Вып. 11. С. 1371–1374.
14. Kissin A. J. Ruby and Sapphire from the Southern Ural Mountains, Russia // Gems & Gemology. 1994. Vol. 30. No. 4. P. 243–252.
15. ГОСТ Р ИСО 24502-2012. Эргономическое проектирование. Требования к яркости и контрастности цветных источников света для людей различных возрастных категорий. М.: Стандартинформ, 2014. 14 с.
16. Кисин А. Ю., Мурзин В. В., Томилина А. В., Смирнов В. Н., Притчин М. Е. Рубиновая минерализация в Мурзинско-Адуйском метаморфическом комплексе (Средний Урал) // Геология рудных месторождений. 2020. Т. 62. № 4. С. 369–388. https://doi.org/10.31857/S0016777020040048
17. Schmetzer K. Pleochroism and Color Change in Faceted Alexandrite: Influence of Cut and Sample Orientation // Gems & Gemology. 2019. Vol. 55. No. 1. P. 61–71. http://dx.doi.org/10.5741/GEMS.55.1.61
18. Xie F., Cao Y., Ranchon C., Hart A., Hansen R., Post J. E., Whitney C. W., Dawson-Tarr E., Drew A. J., Dunstan D. J. Explanation of the Colour Change in Alexandrites // Scientific Reports. 2020. Vol. 10. Article number 6130. https://doi.org/10.1038/s41598-020-62707-3

Статья поступила в редакцию 18 января 2024 года

UDC 535.651:535.243 http://doi.org/10.21440/2307-2091-2024-1-84-96

Application of spectroscopic methods to study and interpretation of Usambara effect

Roman Nikolaevich ZUBOV[1*]
Aleksandr Yur'evich KISIN[2, 3**]

[1]JSC "Regional fund", Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia
[2]The Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russia
[3]Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia

Abstract

The urgency of the problem is due to the fact that description and evaluation of color characteristics in jewelry stones are still based on various colorimetric models. This approach did not reflect optical phenomena that depend on specific physical properties and chemical composition of stones.

The purpose of the work. Proposed paper is an attempt to make a correlation between color and optical properties in jewelry stones and to evaluate the Usambara effect, first discovered in Cr-containing tourmalines.

Methodology of the research – chemical analysis of Cr-containing tourmalines samples on an electron-probe microanalyzer in CUC "Geoanalyst", determination of absorption coefficients for different wavelength ranges on the basis data processing of transmission spectra in Cr-containing tourmalines; compilation of equations of relative light flux F(λ) with approximation of a part of functions by second-order polynomials separately for green and red spectral ranges; numerical study of the relative light flux equations in green and red spectral ranges for different thicknesses of samples.

Results. Samples with high chromium content, with a pronounced Usambar effect, have high absorption values in the α_{Cr} chromoform zone. The study of the relative light flux equation $F(\lambda)$ taking into account the characteristics of the light source, the visible light transmission spectrum of the stone and the spectral sensitivity of the human eye allowed us to accurately predict the "color behavior" of Cr-containing tourmalines for various sizes of jewelry stones.

Summary. This article shows the significant influence of the difference of light absorption coefficients in the middle of the chromophore absorption band, the green and red spectral range to the Usambara effect demonstration. The authors hope that the development of the proposed method will provide a more reasoned explanation of various optical phenomena in jewelry stones.

***Keywords*:** Usambara effect, Cr-containing tourmaline, transmission spectrum, absorption spectrum, light absorption coefficient, geometric light path length.

REFERENCES

1. Halvorsen A. 2006, The Usambara effect and its interaction with other colour change phenomena. *The Journal of Gemmology*, vol. 30, no. 1/2, pp. 1–21. https://doi.org/10.15506/JOG.2006.30.1.1
2. Stone-Sundberg J. 2014, Challenges in orienting alexandrite: the Usambara and other optical effects in synthetic HOC-grown Russian alexandrite. *Gems & Gemology*, vol. 50, no. 1. URL: https://www.gia.edu/gems-gemology/spring-2014-synthetic-alexandrite-stone-sundberg
3. Krzemnicki M. S., Hänni H. A., Reusser E. 2001, Colour-change garnets from Madagascar: comparison of colorimetric with chemical data. *Journal of Gemmology*, vol. 27, no. 7, pp. 395–408.
4. Krzemnicki M. S., Zhou W., Maizlan J. 2013, Colour-change effects in gemstones: causes and perception. 33id IGC. Hanoi, Vietnam, pp. 110–113.
5. Lozhkin L. D. 2012, Color measurement and perception. *Phizika volnovykh protsessov i radiotekhnicheskie sistemy* [Physics of wave processes and radio systems], vol.15, no. 3, pp. 110–122. (*In Russ.*)
6. Taran M. N., Naumenko I. V. 2016, Usambara effect in tourmaline: optical spectroscopy and colourimetric studies. *Mineralogical Magazine*, vol., issue 5, pp. 705–717. https://doi.org/10.1180/minmag.2016.080.016
7. Sun Z., Palke A. C., Renfro N. 2015, Vanadium- and chromium-bearing pink pyrope garnet: characterization and quantitative colorimetric analysis. *Gems & Gemology*, vol. 51, no. 4, pp. 348–369. http://dx.doi.org/10.5741/GEMS.51.4.348
8. Lu R. 2012, Color origin of lavender jadeite: An alternative approach. *Gems & Gemology*, vol. 48, no. 4, pp. 273–283. http://dx.doi.org/10.5741/GEMS.48.4.273
9. Shen C., Lu R. 2018, The Color Origin of Gem Diaspore: Correlation to Corundum. *Gems & Gemology*, vol. 54, no. 4, pp. 394–403. http://dx.doi.org/10.5741/GEMS.54.2.394
10. Dubinsky E. V., Stone-Sundberg J., Emmett J. L. 2020, A Quantitative description of the causes of color in corundum. *Gems & Gemology*, vol. 56, no. 1, pp. 2–28. http://dx.doi.org/10.5741/GEMS.56.1.2
11. Zubov R. N. 2018, Quantitative evaluation of the color of gem stones with allochromatic color. *Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta* [The News of the Ural State Mining University], issue 4(52), pp. 50–56. (*In Russ.*) https://doi.org/10.21440/2307-2091-2018-4-50-56
12. Zubov R. N. 2020, Development of criteria for determining the color saturation of gemstones. *Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta* [The News of the Ural State Mining University], issue1(57), pp. 86–95. https://doi.org/10.21440/2307-2091-2020-1-86-95

✉zrmine@mail.ru
** kissin@igg.uran.ru

13. Lelikov Yu. S., Bochkareva N. I., Gorbunov R. I., Martynov I. A., Rebane Y. T., Tarkhin D. V., Shreter Y. G. 2008, Absorption coefficient measurement of light spreading laterally through LED structures with $In_{0.2}Ga_{0.8}N$/GaN quantum wells. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov* [Semiconductors], vol. 42, issue 11, pp. 1371–1374. (*In Russ*.)
14. Kissin A. J. 1994, Ruby and Sapphire from the Southern Ural Mountains, Russia. *Gems & Gemology*, vol. 30, no. 4, pp. 243–252.
15. GOST R ISO 24502-2012. 2014, Ergonomic design. Requirements for brightness and contrast of colored light sources for people of different age categories. Moscow, 14 p.
16. Kissin A. Yu., Murzin V. V., Tomilina A. V., Smirnov V. N., Pritchin M. E. 2020, Ruby Mineralization in Murzinka–Adui Metamorphic Complex, Central Urals. *Geologiya rudnykh mestoroxhdeniy* [Geology of Ore Deposits], vol. 62, no. 4, pp. 369–388. (*In Russ*.) https://doi.org/10.31857/S0016777020040048
17. Schmetzer K. 2019, Pleochroism and Color Change in Faceted Alexandrite: Influence of Cut and Sample Orientation. Gems & Gemology, vol. 55, no. 1, pp. 61–71. http://dx.doi.org/10.5741/GEMS.55.1.61
18. Xie F., Cao Y., Ranchon C., Hart A., Hansen R., Post J. E., Whitney C. W., Dawson-Tarr E., Drew A. J., Dunstan D. J. 2020, Explanation of the Colour Change in Alexandrites. *Scientific Reports*, vol. 10. Article number 6130. https://doi.org/10.1038/s41598-020-62707-3

The article was received on January 18, 2024

УДК 574.4.+669 http://doi.org/10.21440/2307-2091-2024-1-97-105

Исследования почвенно-растительного покрова в зоне влияния шлаковых отвалов черной металлургии

Екатерина Сергеевна ЗОЛОТОВА*

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

Аннотация

Актуальность работы. Шлаковые отвалы черной металлургии занимают огромные площади по всему миру и являются серьезными источниками загрязнения окружающей среды. Крайне актуальны исследования по экологическому мониторингу техногенных территорий и их рекультивации.

Цель работы – анализ исследований почв и растительности вблизи шлаковых отвалов черной металлургии, находящихся на территории России.

Методы изучения. Обзор исследований проведен по критериям PRISMA с использованием баз данных Google Scholar и Elibrary.

Результаты. Представлена характеристика более чем четырнадцати отвалов доменных, сталеплавильных и ферросплавных шлаков, указан их основной химический состав. Исследования почвенно-растительного покрова, сформировавшегося на отвалах, немногочисленны. Приведена геохимическая оценка некоторых техногенных почв и растительности в зоне влияния предприятий, описано видовое разнообразие фитоценозов, образованных в процессе самозарастания отвалов. Отдельно рассмотрено воздействие отвалов солевых шлаков на экологию близлежащих территорий. Выполнены эксперименты по изучению влияния высокодисперсного шлама на сельскохозяйственные культуры. Показана возможность использования шлаков для восстановления нарушенных земель, например, феррохромовых шлаков Челябинского электрометаллургического комбината для рекультивации угольного карьера разреза «Батуринский».

Выводы. Проведенный анализ позволил обобщить данные о мониторинговых исследованиях почвенно-растительных систем в зоне влияния отвалов черной металлургии в России, показал пробелы в знаниях о загрязнении окружающей среды, динамике накопления тяжелых металлов разными видами почв и растений, а также способах их адаптации в условиях сильной техногенной нагрузки.

***Ключевые слова*:** металлургический шлак, отвалы черной металлургии, тяжелые металлы, мониторинг окружающей среды, загрязнения.

Введение

Черная металлургия – одна из старейших и базовых отраслей промышленности, ее доля составляет 10 % от мирового производства [1, 2]. Лидерами в данной области являются Китай и Индия, Россия занимает пятое место. В связи с интенсификацией производства вопросы минимизации влияния предприятий на окружающую среду крайне актуальны [3, 4]. Утилизации отходов черной металлургии уделяется много внимания [5, 6]. Однако до сих пор большинство отходов складируется в отвалах, шламохранилищах, которые занимают большие территории и являются источниками загрязнения окружающей среды [7, 8].

Шлаки черной металлургии подразделяются на доменные (при выплавке чугуна), сталеплавильные (мартеновские, конверторные, электросталеплавильные) и ферросплавные. В мире ежегодно предприятия черной металлургии образуют около 310–380 млн т шлаков при производстве чугуна, 180–270 млн т – при получении стали [6]. В России площади, занятые шлаковыми отвалами, превышают 2,2 тыс. га [9]. Известно, что при длительном хранении происходят изменения состава и свойств шлаков, возрастает миграция токсичных элементов в окружающую среду [10, 11].

Довольно много исследований посвящено изучению влияния шлаковых отвалов черной металлургии на водные экосистемы [8, 12–14]. Значительно меньше внимания уделено загрязнению почв и растений вблизи металлургических производств, а также формированию почвенно-растительного покрова на самих отвалах. Анализ исследований, проводимых по этому направлению в России, и ставится целью данного литературного обзора.

Методы исследования

Обзор исследований проведен по критериям PRISMA [15] с использованием баз данных Google Scholar и Elibrary. Поиск проводился по запросу «Отвалы черной металлургии». Критерии отбора: исследования должны проводиться на территории России. Объект изучения – растительность и почвы вблизи предприятий черной металлургии.

Результаты исследований

Лидером по количеству образующихся техногенных отходов среди субъектов РФ является Кемеровская область (Кузбасс), табл. 1. В шлаковых отвалах металлурги-

✉zolotova@igg.uran.ru

Таблица 1. Краткая характеристика некоторых шлаковых отвалов черной металлургии (Россия)
Table 1. Brief characteristics of some slag dumps of ferrous metallurgy (Russia)

Отвал	Расположение	Площадь, га/объем, млн т	Основной состав, мас. %
Сталеплавильный шлак ООО «Юргинский машиностроительный завод»	Кемеровская область, в городской черте г. Юрга, вдоль р. Юргинки (впадает в р. Томь)	50	52 % CaO; 26 % SiO_2; 12 % MgO; 3,22 % Fe_2O_3; 3,04 % MnO [19]
Шламохранилище ОАО «Западно-Сибирский металлургический комбинат»: конвертерный и сталеплавильный шлак	Кемеровская область, г. Новокузнецк	300/77,3 (жидкие и твердые)	31,5–32,4 % CaO; 23,7–27,9 % SiO_2; 12,9–14,5 % $Fe_{общ}$; 14,1–15,5 % MgO; 6,6–7,6 % Al_2O_3; 2,8–3,4 % MnO [20]
Доменные шлаки Металлургического завода им. А. К. Серова	Свердловская область, территория завода, 1,5 км севернее р. Каквы, южная часть отвала	47,29/3,9	46 % CaO; 42,82 % SiO_2; 12,78 % Al_2O_3; 10–15 % MgO; 2,5 % FeO [21]
Сталеплавильные шлаки Металлургического завода им. А. К. Серова	Свердловская область, территория завода, 1,5 км севернее р. Каквы, северная часть отвала		38,81 % CaO; 18,86 % SiO_2; 17,25 % FeO; 12 % MgO; 5,45 % Fe_2O_3; 3,74 % Al_2O_3 [21]
Доменные и сталеплавильные шлаки ОАО «ЕВРАЗ НТМК»	Свердловская область, левый берег р. Сухая Ольховка, сформированы на естественном рельефе путем сливания шлаков по откосу	135/54,3	10–30 % SiO_2; 30–40 % CaO; 5–15 % Al_2O_3; 10–15 % MgO [22]
Доменные и феррованадиевые шлаки ОАО «Чусовской металлургический завод»	Пермский край, г. Чусовой, северо-восточная часть территории предприятия Основная часть отвалов находится в 80 м от моста через р. Усьву	98	Доменные шлаки: 25–35 % SiO_2; 5–15 % Al_2O_3; 6–12 % MgO; 2–6 % CaO; 1–2,5 % TiO_2; 0,5–2,5 % Fe_2O_3 + FeO Феррванадиевые шлаки: 25–50 % CaO; 25–35 % SiO_2; 5–15 % Al_2O_3; 6–12 % MgO; 1–2,5 % TiO_2; 0,5–2,5 % Fe_2O_3 + FeO [23]
Доменный шлак Челябинского металлургического комбината (ОАО «Мечел», ЧМК)	Челябинская область, г. Челябинск, территория завода	150/2,57	37 % SiO_2; 33,8–34,3 % CaO; 11,8–12,6 % Al_2O_3; 12 % MgO; 1,4–2,1 % TiO_2 [24]
Шлаки производства феррохрома Челябинского электрометаллургического комбината (ОАО «ЧЭМК»)	Челябинская область, г. Челябинск, территория завода, высота насыпи – 20–30 м;	47,7/23,4	41–42 % SiO_2; 27–30 % MgO; 13 % Al_2O_3; 3 % CaO; 1,9–2,5 % Cr_2O_3 [25]
	Челябинская область, отработанный угольный карьер разреза «Батуринский», Увельский район, вблизи пос. Красногорский	0,97 (план)	Дисперсный порошок с удельной поверхностью 200 $м^3$/кг, 51,2 % CaO; 23,5 % SiO_2; 12,1 % MgO; 5,8 % Cr_2O_3; 5,1 % Al_2O_3 [26]
ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат»	Челябинская область, рекультивация карьеров месторождения «Гора Магнитная»	Нет данных/160	Первичный конвертерный шлак: 40,5 % CaO; 16,6 % SiO_2; 13,3 % MgO [27]
Сталеплавильные шлаки и отработанная формовочная смесь АО «Мотовилихинские заводы»	Пермская область, на первой левобережной надпойменной террасе р. Камы	5,4	70,3 % SiO_2; 12,9 % $Fe_{общ}$; 4,8 % Al_2O_3; 2,37 % MgO; 1,75 % CaO [28]
Сталеплавильные конвертерные шлаки Новолипецкого металлургического комбината (НЛМК)	Липецкая область, на левом берегу р. Воронеж	25/5 (переработан к 2020 г.)	40,4 % CaO; 19,9 % Fe_2O_3 + MgO; 12,2 % SiO_2; 6,2 % Al_2O_3 [29]
Доменные шлаки Череповецкого металлургического комбината (ПАО «Северсталь»)	Вологодская область, г. Череповец, на территории завода	0,6891/0,005	37–40 % CaO; 37–39 % SiO_2; 10–12 % MgO; 8–10 % Al_2O_3
Пирометаллургические шлаки комбината «Североникель»	Мурманская область, г. Мончегорск	93,3/39	35–50 % SiO_2; 20–39 % FeO; 4–20 % MgO; 4–8 % Al_2O_3 [30]
Солевые алюминатные шлаки ОАО «Мценский литейный завод»	Орловская область, Мценский район, район деревни Большое Думчино	10/3,5	Al_2O_3 (60,22 %); SiO_2 (14,87 %); MgO (5,83 %) [31]

ческих комбинатов накоплено более 100 млн т доменных и сталеплавильных шлаков [16]. Исследования почвенно-растительного покрова вблизи отвалов данного региона представлены крайне скудно. Отмечено негативное воздействие шлакоотвала Юргинского машиностроительного завода на древесную растительность [17]. Исследован почвенно-растительный покров шламохранилища ОАО «Западно-Сибирский металлургический комбинат» [18]. Выявлено преобладание эмбриоземов органо-аккумулятивных, описан состав пионерного сообщества: овсяница луговая (*Festuca pratensis*); ежа сборная (*Dactylis glomerata*); пырей ползучий (*Elytrigia repens*); костер безостый (*Bromus arvensis*); полынь обыкновенная (*Artemisia vulgaris*); полынь горькая (*Artemisia absinthium*) и др. Древесная растительность представлена тополем дрожащим (*Populus tremula*) и кленом ясенелистным (*Acer negundo*) [18].

В Уральском регионе общий объем отвалов шлаков черной металлургии составляет около 70 млн т [32]. Самые крупные из них сформированы Металлургическим заводом им. А. К. Серова, Нижнетагильским металлургическим комбинатом (ОАО «ЕВРАЗ НТМК»), Магнитогорским и Челябинским металлургическими комбинатами, а также Чусовским металлургическим заводом.

В санитарной зоне отвала доменных и сталеплавильных шлаков, расположенной на территории Металлургического завода им. А. К. Серова (табл. 1), проведена геохимическая оценка гумусового горизонта техногенных почв [21]. ПДК превышены для меди, цинка, свинца, хрома, никеля, ванадия, марганца. Наиболее высокие коэффициенты концентрации установлены для хрома, марганца и никеля. Для выявления влияния отвала на древесную растительность отбирались листья ивы, но количественные данные не представлены.

Проведено экологическое исследование шлаковых отвалов ОАО «ЕВРАЗ НТМК»: доменных (передельный ванадиевый и литейный доменные шлаки, в западной части отвала – мелкие фракции переработки шлаков) и сталеплавильных шлаков (конвертерный, сталеплавильный, сварочный шлаки, шламы доменного производства), табл. 1. Для гумусового горизонта почв в зоне влияния отвалов превышены значения ПДК подвижных форм элементов по марганцу (1,7–6,5 раза) и цинку (от 1,4 раза); условно-фоновые значения – по ванадию (от 1,2 до 14,8 раза) и железу (от 1,5 до 5,6 раза) [22]. Для иллювиального горизонта превышения сохраняются по марганцу (от 1,2 до 2,0 раза) и железу (от 2,6 до 3,5 раза). Валовые содержания в иллювиальном горизонте ванадия, марганца и хрома здесь ниже, чем в гумусовом горизонте, но превышения ПДК также есть, хотя и незначительные (марганец – до 1,51 раза; ванадий – до 1,16 раза). Выявлено, что растения (виды не указаны) вблизи отвалов обогащены ванадием, железом, хромом, а для марганца, меди и цинка разница не установлена [22]. Позднее были исследованы морфология и химический состав магнитных сферул из почв вблизи отвала «ЕВРАЗ НТМК» [33].

На территории ОАО «Чусовской металлургический завод» находится отвал доменных и феррованадиевых шлаков (табл. 1). В грунтах отвала концентрация некоторых токсичных элементов доходит до следующих значений: 5700 мг/кг меди, 830 мг/кг цинка, 1700 мг/кг хрома, 2500 мг/кг марганца [34]. Выявлено чрезвычайно опасное суммарное загрязнение городских почв вблизи металлургического завода [35]. Изучен почвенно-растительный покров острова Закурье, северная часть которого граничит с Чусовским металлургическим заводом [36]. По агрохимическим показателям почва вблизи предприятия характеризуется высоким значением общей минерализации (84,9 мг/дм^3 в пересчете на NaCl), низкой обеспеченностью фосфором (5,44 мг/100 г почвы) и гумусом (3,7 % по массе), pH водной вытяжки равен 8,3, концентрация меди – 121,9 мг/кг. С помощью хроматографии исследовано содержание тяжелых металлов в двух видах лекарственных растений: тысячелистник обыкновенный (*Achillea millefolium* L.) и пижма обыкновенная (*Tanacetum vulgare* L.,); выявлены значительные превышения ПДК [36].

Проведены исследования по оценке пылевой эмиссии самораспадающихся феррохромовых шлаков Челябинского электрометаллургического комбината (табл. 1) из места складирования – отработанного угольного карьера разреза «Батуринский» [26]. Складирование отходов начато в 2002 г., изучение микроэлементного состава почв, пылевых смывов с листьев и самих растений (7 видов) проведено в 2004 г. Выявлены высокие концентрации хрома в клевере красном (*Trifolium pratense* L.) – 974 мг/кг, в тимофеевке луговой (*Phleum pratense* L.) – 436 мг/кг, в ковыле перистом (*Stipa pennata* L.) – 260 мг/кг. Особенности микроэлементного состава растений в зоне влияния отвала выявлены с использованием метода главных компонент [26].

Феррованадиевые шлаки Чусовского металлургического завода предлагалось использовать для рекультивации террикоников Кизеловского угольного бассейна [37]. Шлаки Магнитогорского металлургического комбината – при рекультивации карьеров месторождения «Гора Магнитная» [38].

На примере ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» показана оценка воздействия загрязнений на лесные массивы с использованием спутниковых изображений [39].

Для сталеплавильного шлакового отвала ПАО «Мотовилихинские заводы» изучено видовое разнообразие фитоценоза, образованного в процессе самозарастания [40]. Основа формирования – растительность сопредельной территории (сходство фитоценозов – 69,2 %). Однако количественные характеристики существенно ниже для отвала: видовое разнообразие 27 видов вместо 35, проективное покрытие менее 10 % вместо 35 %. Среди древесно-кустарниковых видов на отвале распространены тополь дрожащий (*Populus tremula* L.) и тополь черный (*Populus nigra* L.), смородина черная (*Ribes nigrum* L.), яблоня ягодная (*Malus boccata* (L.) Borkh.) и клен ясенелистный (*Acer negundo* L.), который активно расселяется и может быть использован на биологическом этапе рекультивации [40]. Определены 10 видов травянистых растений, произрастающих на всей территории отвала (встречаемость 80–90 %): бодяк полевой (*Cirsium arvense* (L.) Scop.), осот желтый (*Sonchus arvensis* L.), пижма обыкновенная (*Tanacetum vulgare* L.), полынь горькая (*Artemisia absinthium* L.), пастернак посевной (*Pastinaca sativa* L.) и др. [40].

В Центрально-Черноземном районе одними из основных объектов накопления техногенных отходов являются отвалы и шламонакопители Новолипецкого металлургического комбината (НЛМК) и Череповецкого металлургического комбината (ПАО «Северсталь») [16]. По данным новостных каналов, в 2020 г. НЛМК завершил проект по переработке шлакового отвала (табл. 1). Влияние отвала на почвенно-растительные системы не исследовалось.

Расположение Череповецкого металлургического комбината, являющегося вторым по величине сталелитейным комбинатом России, недалеко от Дарвинского биосферного заповедника ЮНЕСКО диктует особые требования к мониторингу окружающей среды [41], тем более что уже в 1990-х гг. была установлена техногенная геохимическая аномалия, образовавшаяся в результате длительных выбросов [42]. Исследовано содержание различных форм соединений лантаноидов в дерново-карбонатных почвах на различном расстоянии от Череповецкого металлургического комбината [43]. Также был проведен эксперимент по оценке влияния высокодисперсного шлама на морфологические и физиолого-биохимические параметры у пятнадцати видов сельскохозяйственных культур в начальные стадии онтогенеза [44]. Уровень накопления пролина в растениях предложили использовать в качестве стресс-маркера для выявления видоспецифичности действия шламов на растения [45].

Отвальные шлаки пирометаллургического передела, образующиеся на комбинате «Североникель» (табл. 1), преимущественно состоят из двуокиси кремния и окиси железа, вредные примеси представлены серой – 5–10 %, хромом – 0,4 %, никелем – 0,1 %, медью – 0,2 %, кобальтом – 0,05 % [30]. Проведены исследования почвенно-растительного покрова на разном расстоянии от завода, показаны изменения содержания подвижных форм никеля, меди, железа, магния и pH в почвах сосновых лесов, химический состав хвои и растений травяно-кустарничкового яруса [46]. Установлено, что вблизи комбината на погибшем верхнем оторфованном горизонте подавлена популяция микроскопических грибов [47].

Отдельно стоит упомянуть солевые шлаки – побочный продукт процесса плавки лома и отходов алюминия под слоем флюса, состоящий из хлоридов и нитридов щелочных металлов, с добавлением небольшого количества фторсодержащих соединений [31]. Для территорий, граничащих с отвалами солевых шлаков ОАО «Мценский литейный завод» (табл. 1), изучена 13-летняя (с 2003 по 2016 г.) динамика загрязнения тяжелыми металлами [48]. Для анализа техногенного фактора загрязнения почв применяли уточненный коэффициент обогащенности тяжелых металлов (УКО), подсчитана доля техногенности металла в процентах от его валового содержания. По величине данного коэффициента для светло-серой лесной почвы в слое 0–20 см установлен следующий ряд потенциально опасных элементов: Cu > Zn > Cd > Pb > Ni > Cr в непосредственной близости к шлаковому отвалу. Доказано влияние максимального скопления шлаковых отходов в отвале на интенсивность накопления и закрепление исследуемых металлов в верхнем гумусовом слое и их распределение в профиле почвы [48].

Некоторые шлаки металлургических производств являются основным техногенным мусором вблизи небольших городов, их также использовали для отсыпки дорог. Например, отходы Алапаевского металлургического завода. Для данных шлаков производства низколегированного хромистого чугуна изучены минералогия и вещественный состав [49]. Исследование влияния данных шлаков на загрязнение растительности и почв тяжелыми металлами не проводилось.

Заключение

Мониторинг окружающей среды вблизи предприятий черной металлургии необходим для обеспечения экологической безопасности регионов России. В результате литературного обзора представлена характеристика более чем четырнадцати отвалов доменных, сталеплавильных и ферросплавных шлаков, указан их основной химический состав. Исследования почвенно-растительного покрова, сформировавшегося на отвалах, немногочисленны. Авторы проводили геохимическую оценку некоторых техногенных почв и растительности в зоне влияния предприятий черной металлургии, описывали видовое разнообразие фитоценозов, образованных в процессе самозарастания отвалов. Некоторые шлаки использовались для рекультивации нарушенных земель, например, феррохромовые шлаки Челябинского электрометаллургического комбината для рекультивации угольного карьера разреза «Батуринский». Проведенный анализ позволил обобщить данные о мониторинговых исследованиях почвенно-растительных систем в зоне влияния отвалов черной металлургии, показал пробелы в знаниях о загрязнении окружающей среды, динамики накопления тяжелых металлов разными видами почв и растений, а также способах их адаптации в условиях сильной техногенной нагрузки.

Источник финансирования

Исследования выполнены в рамках Государственного задания ИГГ УрО РАН, тема № НИОКТР 123011800011-2.

ЛИТЕРАТУРА

1. Печенская-Полищук М. А., Малышев М. К. Особенности развития черной металлургии в России и мире // Проблемы прогнозирования. 2022. № 1 (190). С. 125–135. https://doi.org/10.47711/0868-6351-190-125-135

2. Feng C., Huang J.-B., Wang M. The sustainability of China's metal industries: features, challenges and future focuses // Resources Policy. 2019. Vol. 60. P. 215–224. https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2018.12.006

3. Захарова М. А., Водолеев А. С., Андреева О. С., Домнин К. И. Оценка экологического состояния снежного и почвенного покровов в границах санитарно-защитной зоны АО ЕВРАЗ ЗСМК // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2021. Т. 77. № 12. С. 1309–1313. https://doi.org/10.32339/0135-5910-2021-12-1309-1313

4. Liang T., Wang S., Lu C., Jiang N., Long W., Zhang M., Zhang R. Environmental impact evaluation of an iron and steel plant in China: Normalized data and direct/indirect contribution // Journal of Cleaner Production. 2020. Vol. 264. Article number 121697. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121697

5. Шавакулева О. П., Сединкина Н. А., Гмызина Н. В., Косарев Л. В. Разработка технологии комплексной переработки шлаков Златоустовского металлургического завода // Устойчивое развитие горных территорий. 2022. Т. 14. № 1 (51). С. 87–95. https://doi.org/10.21177/1998-4502-2022-14-1-87-95
6. Yang J., Firsbach F., Sohn I. Pyrometallurgical processing of ferrous slag "co-product" zero waste full utilization: A critical review // Resources, Conservation and Recycling. 2022. Vol. 178. Article number 106021. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.106021
7. Iluţiu-Varvara D.-A., Aciu C. Metallurgical Wastes as Resources for Sustainability of the Steel Industry // Sustainability. 2022. Vol. 14(9). Article number 5488. https://doi.org/10.3390/su14095488
8. Mal U., Adhikari K., Tripathi A. Steel plant slag dumps: A potential source of groundwater contamination // Journal of Earth System Science. 2022. Vol. 131. Iss. 1. P. 1–18. Article number 45. https://doi.org/10.1007/s12040-021-01776-y
9. Шешуков О. Ю., Егиазарьян Д. К., Лобанов Д. А. Безотходная переработка ковшевого и электропечного шлака // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 3. С. 192–199. https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-3-192-199
10. Паршина М. В. Эколого-геохимические особенности трансформации шлаковых отвалов в зоне ацидификации // Записки Горного института. 2006. Т. 167. № 1. С. 90–93.
11. Погромский А. С., Аниканова Т. В. Влияние длительного хранения электросталеплавильных шлаков в отвалах на их свойства // Строительные материалы и изделия. 2018. Т. 1. № 1. С. 32–39. https://doi.org/10.34031/2618-7183-2018-1-1-32-39
12. Пугин К. Г. Негативное воздействие шлаковых отвалов черной металлургии на объекты окружающей среды на примере города Чусового // Экология урбанизированных территорий. 2011. № 2. С. 86–90.
13. Михайличенко К. Ю., Курбатова А. И., Доронцова А. Ю., Паукова А. А. Оценка качества воды и состояния донных отложений северной части Рыбинского водохранилища выбросами ЧерМК ПАО «Северсталь» // Экология и промышленность России. 2019. Т. 23. № 10. С. 39–43. https://doi.org/10.18412/1816-0395-2019-10-39-43
14. Le S. T., Le A. T., Cao M. T. T., Pham H. B., Nguyen T. T., Le T. T., Nishiwaki N. Assessment of water quality under real-world conditions: effects of steel slag backfills on ground and surface water // Environmental Science: Water Research & Technology. 2022. Vol. 8. Iss. 12. P. 3043–3053. https://doi.org/10.1039/D2EW00649A
15. Liberati A., Altman D. G., Tetzlaff J., Mulrow C., Gøtzsche P. C., Ioannidis J. P. A., Clarke M., Devereaux P. J., Kleijnen J., Moher D. The PRISMA Statement for Reporting Systematic Reviews and Meta-Analyses of Studies That Evaluate Health Care Interventions: Explanation and Elaboration // PLoS Medicine. 2009. Vol. 6. No. 7. Article number 1000100. https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000100
16. Волынкина Е. П. Анализ состояния и проблем переработки техногенных отходов в России // Вестник СибГИУ. 2017. № 2 (20). С. 43–49.
17. Ершова Н. В. Характеристика металлургического производства ООО «Юргинский машзавод» как источника воздействия на окружающую среду // Международный студенческий научный вестник. 2016. № 6. URL: https://eduherald.ru/ru/article/view?id=16758
18. Двуреченский В. Г., Соколов Д. А., Топоровская А. А., Берлякова О. Г. Почвенно-экологическое состояние урбанизированных территорий Западной Сибири (на примере г. Новокузнецка) // Почвоведение и агрохимия. 2011. № 2. С. 5–13.
19. Сидоренко А. С., Нозирзода Ш. С. Оценка воздействия металлургических шлаков ООО «ЮМЗ» на состояние окружающей среды г. Юрги // Неразрушающий контроль: сборник трудов VI Всерос. науч.-практ. конф. Томск, 2016. С. 311–315.
20. Столбоушкин А. Ю. Получение силикатных материалов с добавкой тонкомолотого мартеновского шлака // Строительные материалы. 2019. № 8. С. 26–32. https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-773-8-26-32
21. Гуман О. М., Долинина И. А., Макаров А. Б. Геоэкологические условия района размещения шлакоотвала и отстойника-шламонакопителя Серовского металлургического завода // Известия УГГГА. 2002. Вып. 15. С. 263–272.
22. Захаров А. В., Гуман О. М., Макаров А. Б., Антонова И. А., Ли Т. И. Экологическое состояние окружающей среды отвалов черной металлургии (по результатам мониторинга шлакового отвала НТМК) // Известия УГГУ. 2014. Вып. 3 (35). С. 51–56.
23. Игнатова А. М., Пушкин С. А., Наумов В. А. Геохимическое исследование техногенных образований доменного и феррованадиевого производств Чусовского металлургического завода с целью электродугового петургического рециклинга // Научно-технический вестник Поволжья. 2013. № 5. С. 173–179.
24. Капнин В. В., Гильманов М. Р., Поляков Н. С. Совершенствование технологии доменной плавки на Челябинском металлургическом комбинате // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2018. Т. 1. № 4. С. 57–61.
25. Потапов Д. С., Потапов С. С. Минералогия шлаков производства феррохрома Челябинского электрометаллургического комбината // Успехи современного естествознания. 2010. № 8. С. 23–25.
26. Сокол Э. В., Нигматулина Е. Н., Нохрин Д. Ю. Пылевая эмиссия хрома из мест складирования шлаков феррохромового производства: на примере окрестностей пос. Красногорский, Челябинская область // Сибирский экологический журнал. 2010. Т. 17. № 6. С. 851–863. http://elibrary.ru/item.asp?id=15603607
27. Гмызина Н. В., Сединкина Н. А., Горлова О. Е. Изучение свойств конвертерных шлаков с целью совершенствования технологии их переработки // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2019. Т. 75. № 5. С. 623–631. https://doi.org/10.32339/0135-5910-2019-5-623-631
28. Меньшикова Е. А., Блинов С. М., Боков Д. А., Жакова У. В. Исследование возможности использования вещества отвала сталеплавильных шлаков // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении: научные чтения памяти П. Н. Чирвинского. 2009. № 12. С. 317–319.
29. Подольский Вл. П., Кукина О. Б., Слепцова О. В. Анализ химико-минералогического состава отвальных сталеплавильных конвертерных шлаков // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Сер.: Физико-химические проблемы и высокие технологии строительного материаловедения. 2014. № 1. С. 126–130.
30. Паршина М. В. Влияние процессов гипергенной метаморфизации техногенных массивов на степень их экологической опасности для окружающей природной среды // Записки Горного института. 2009. Т. 180. С. 33–35.
31. Пономарева П. В., Сычева Л. И. Влияние алюминатных шлаков на синтез и свойства сульфоминерального цемента // Успехи в химии и химической технологии. 2022. Т. 36. № 3 (252). С. 123–126. https://www.elibrary.ru/zekcye
32. Макаров А. Б. Техногенные месторождения черных металлов // Региональные проблемы геологии, географии, техносферной и экологической безопасности. Оренбург: ИП Востриков К «Полиарт», 2019. С. 42–45. https://www.elibrary.ru/nztwao
33. Макаров А. Б., Осовецкий Б. М., Антонова И. А. Магнитные сферулы из почв вблизи шлакового отвала Нижнетагильского металлургического комбината // Известия УГГУ. 2017. Вып. 4 (48). С. 42–45. https://doi.org/10.21440/2307-2091-2017-4-42-45
34. Брызгалов С. В., Пугин К. Г., Вайсман Я. И., Максимович Н. Г., Калинина Е. В. Влияние мест размещения доменных металлургических шлаков на объекты окружающей среды // Отходы: экология, технология, ресурсосбережение. М., 2009. С. 35–39.
35. Васильев А. А., Чащин А. Н. Особенности пространственной неоднородности в картографии загрязнения почв тяжелыми металлами // Природообустройство. 2014. № 2. С. 25–29.
36. Соловьев А. Д., Щербань М. Г., Плотникова М. Д. Влияние техногенных и природных факторов на содержание металлов-поллютантов в лекарственных растениях Среднего Предуралья (о. Закурье, г. Чусовой) // Географический вестник. 2020. № 4 (55). С. 152–165. https://doi.org/10.17072/2079-7877-2020-4-152-165

37. Устенко С. В., Егорова А. Н., Залевская Ю. М., Пугин К. Г. Рекультивация терриконików Кизеловского угольного бассейна промышленными отходами // Экология и научно-технический прогресс. Урбанистика: материалы XIII Всерос. науч.-практ. конф. Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2016. Т. 1. С. 360–365.
38. Рыбников П. А., Рыбникова Л. С. Обоснование экологической безопасности захоронения отходов в выработанном пространстве (на примере Восточного карьера Магнитогорского металлургического комбината, Челябинская область) // Экологическая и техносферная безопасность горнопромышленных регионов: сборник трудов IV Междунар. науч.-практ. конф. Екатеринбург, 2016. С. 322–329.
39. Мешалкин В. П., Бутусов О. Б., Дови В. Дж., Белозерский А. Ю., Челноков В. В. Оценка воздействия химических загрязнений предприятий черной металлургии на лесные массивы с использованием спутниковых фотоизображений // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 11. С. 839–845. https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-11-839-845
40. Лихачев С. В., Пименова Е. В., Жакова С. Н. Экологические условия формирования фитоценоза шлакового отвала сталеплавильного производства // Вестник ИрГСХА. 2019. Вып. 92. С. 67–75.
41. Зайцев В. С. Анализ природоохранной деятельности предприятий горно-металлургической отрасли на примере Череповецкого комбината ПАО «Северсталь» // Экономика промышленности / Russian Journal of Industrial Economics. 2020. Т. 13. № 2. С. 244–256. https://doi.org/10.17073/2072-1633-2020-2-244-256
42. Водяницкий Ю. Н., Большаков В. А., Сорокин С. Е., Фатеева Н. М. Техногеохимическая аномалия в зоне влияния Череповецкого металлургического комбината // Почвоведение. 1995. № 4. С. 498–507.
43. Ладонин Д. В. Лантаноиды в почвах зоны воздействия Череповецкого металлургического комбината // Почвоведение. 2017. № 6. С. 680–689. https://doi.org/10.7868/80032180X17060041
44. Астафурова Т. П., Зотикова А. П., Михайлова С. И., Буренина А. А. Биологические эффекты и механизмы воздействия высокодисперсных металлургических отходов на морфологические и физиолого-биохимические параметры сельскохозяйственных растений // Растения в условиях глобальных и локальных природно-климатических и антропогенных воздействий: тез. докл. Всерос. науч. конф. с международным участием. Петрозаводск, 2015. С. 45. URL: http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Repository/vtls:000587134
45. Зибарева Л. Н., Жилина О. В., Буренина А. А., Моргалёв Ю. Н. Исследование воздействий высокодисперсных металлургических отходов на содержание пролина в листьях сельскохозяйственных растений // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 4. С. 1–8. URL: http://www.science-education.ru/pdf/2013/4/98.pdf
46. Паршина М. В., Корельский Д. С. Комплексный мониторинг воздействия комбината «Североникель» на природную среду // Записки Горного института. 2008. Т. 174. С. 217–221.
47. Корнейкова М. В., Евдокимова Г. А. Градиент комплексов микроскопических грибов в загрязненных тяжелыми металлами почвах // Современные проблемы загрязнения почв: III Междунар. конф. М., 2010. С. 227–231.
48. Степанова Л. П., Яковлева Е. В., Писарева А. В. Пространственно-временная динамика почвенно-геохимических аномалий в зоне воздействия шлаковых отходов // Экология и промышленность России. 2019. Т. 23. № 3. С. 44–48. https://doi.org/10.18412/1816-0395-2019-3-44-48
49. Ерохин Ю. В., Захаров А. В., Леонова Л. В. Шлаки производства хромистого чугуна Алапаевского завода (состав и геоэкология) // Известия вузов. Горный журнал. 2020. № 5. С. 90–99. https://doi.org/10.21440/0536-1028-2020-5-90-99

Статья поступила в редакцию 19 декабря 2023 года

http://doi.org/10.21440/2307-2091-2024-1-97-105

UDC 574.4.+669

Research of soil and vegetation cover in the zone of influence of slag dumps of ferrous metallurgy

Ekaterina Sergeevna ZOLOTOVA*

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

Abstract

Relevance. Slag dumps of ferrous metallurgy occupy vast areas around the world and are serious sources of environmental pollution. Research on environmental monitoring of man-made areas and their reclamation is extremely relevant.

The purpose of the work is to analyze the studies of soils and vegetation near slag dumps of ferrous metallurgy located in Russia.

Research methodology. The review of studies was carried out according to PRISMA criteria using Google Scholar and Elibrary databases.

Results. The characteristics of more than fourteen dumps of blast furnace, steelmaking and ferroalloy slag are presented, their basic chemical composition is indicated. Studies of the soil and vegetation cover formed on dumps are few. A geochemical assessment of some technogenic soils and vegetation in the zone of influence of enterprises is given, and the species diversity of phytocenoses formed in the process of self-overgrowing of dumps is described. The impact of salt slag dumps on the ecology of nearby areas is separately considered. Experiments were carried out to study the influence of highly dispersed sludge on agricultural crops. The possibility of using slags to restore disturbed lands has been shown, for example, ferrochrome slags from the Chelyabinsk Electrometallurgical Plant for the reclamation of the Baturinsky open-pit coal mine.

Conclusions. The analysis made it possible to summarize data on monitoring studies of soil and plant systems in the zone of influence of ferrous metallurgy dumps in Russia, showed gaps in knowledge about environmental pollution, the dynamics of accumulation of heavy metals by different types of soils and plants, as well as methods of their adaptation under conditions of strong technogenic pressure.

***Keywords*:** metallurgical slag, ferrous metallurgy dumps, heavy metals, environmental monitoring, pollution.

Source of financing

The research was carried out within the framework of the State assignment of the Institute of Geography, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, topic No. NIOKTR 123011800011-2.

REFERENCES

1. Pechenskaya-Polishchuk M. A., Malyshev M. K. 2022, Features of the development of ferrous metallurgy in Russia and the world. *Problemy prognozirovaniya* [Forecasting problems], no. 1 (190), pp. 125–135. (*In Russ.*) https://doi.org/10.47711/0868-6351-190-125-135
2. Feng C., Huang J.-B., Wang M. 2019, The sustainability of China's metal industries: features, challenges and future focuses. *Resources Policy*, vol. 60, pp. 215–224. https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2018.12.006
3. Zakharova M. A., Vodoleev A. S., Andreeva O. S., Domnin K. I. 2021, Assessment of the ecological state of snow and soil cover within the boundaries of the sanitary protection zone of JSC EVRAZ ZSMK. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoy i ekonomicheskoy informatsii* [Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information], vol. 77, no. 12, pp. 1309–1313. (*In Russ.*) https://doi.org/10.32339/0135-5910-2021-12-1309-1313
4. Liang T., Wang S., Lu C., Jiang N., Long W., Zhang M., Zhang R. 2020, Environmental impact evaluation of an iron and steel plant in China: Normalized data and direct/indirect contribution. *Journal of Cleaner Production*, vol. 264, article number 121697. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121697
5. Shavakuleva O. P., Sedinkina N. A., Gmyzina N. V., Kosarev L. V. 2022, Development of technology for complex processing of slags from the Zlatoust Metallurgical Plant. *Ustoychivoye razvitiye gornykh territoriy* [Sustainable development of mountain areas], vol. 14, no. 1 (51), pp. 87–95. (*In Russ.*) https://doi.org/10.21177/1998-4502-2022-14-1-87-95
6. Yang J., Firsbach F., Sohn I. 2022, Pyrometallurgical processing of ferrous slag "co-product" zero waste full utilization: A critical review. *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 178, article number 106021. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.106021
7. Iluţiu-Varvara D. A., Aciu C. 2022, Metallurgical Wastes as Resources for Sustainability of the Steel Industry. *Sustainability*, vol. 14 (9), article number 5488. https://doi.org/10.3390/su14095488
8. Mal U., Adhikari K., Tripathi A. 2022, Steel plant slag dumps: A potential source of groundwater contamination. *Journal of Earth System Science*, vol. 131, issue 1, pp. 1–18, article number 45. https://doi.org/10.1007/s12040-021-01776-y
9. Sheshukov O. Yu., Egiazaryan D. K., Lobanov D. A. 2021, Waste-free processing of ladle and electric furnace slag. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya metallurgiya* [News of Universities. Ferrous metallurgy], vol. 64, no. 3, pp. 192–199. (*In Russ.*) https://doi.

✉zolotova@igg.uran.ru

org/10.17073/0368-0797-2021-3-192-199
10. Parshina M. V. 2006, Ecological and geochemical features of the transformation of slag dumps in the acidification zone. *Zapiski Gornogo instituta* [Notes of the Mining Institute], vol. 167, no. 1, pp. 90–93. (*In Russ*.)
11. Pogromsky A. S., Anikanova T. V. 2018, The influence of long-term storage of electric furnace slags in dumps on their properties. *Stroitel'nyye materialy i izdeliya* [Construction materials and products], vol. 1, no. 1, pp. 32–39. (*In Russ*.) https://doi.org/10.34031/2618-7183-2018-1-1-32-39
12. Pugin K. G. 2011, Negative impact of ferrous metallurgy slag dumps on environmental objects using the example of the city of Chusovoy. *Ekologiya urbanizirovannykh territoriy* [Ecology of urban areas], no. 2, pp. 86–90. (*In Russ*.)
13. Mikhailichenko K. Yu., Kurbatova A. I., Dorontsova A. Yu., Paukova A. A. 2019, Assessment of water quality and the state of bottom sediments in the northern part of the Rybinsk Reservoir using emissions from CherMK PJSC "Severstal". *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and industry of Russia], vol. 23, no. 10, pp. 39–43. (*In Russ*.) https://doi.org/10.18412/1816-0395-2019-10-39-43
14. Le S. T., Le A. T., Cao M. T. T., Pham H. B., Nguyen T. T., Le T. T., Nishiwaki N. 2022, Assessment of water quality under real-world conditions: effects of steel slag backfills on ground and surface water. *Environmental Science: Water Research & Technology*, vol. 8, issue 12, pp. 3043–3053. https://doi.org/10.1039/D2EW00649A
15. Liberati A., Altman D. G., Tetzlaff J., Mulrow C., Gøtzsche P. C., Ioannidis J. P. A., Clarke M., Devereaux P. J., Kleijnen J., Moher D. 2009, The PRISMA Statement for Reporting Systematic Reviews and Meta-Analyses of Studies That Evaluate Health Care Interventions: Explanation and Elaboration. *PLoS Medicine*, vol. 6., no. 7, article number 1000100. https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000100
16. Volynkina E. P. 2017, Analysis of the state and problems of processing industrial waste in Russia. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo industrial'nogo universiteta* [Bulletin of the Siberian State Industrial University], no. 2 (20), pp. 43–49. (*In Russ*.)
17. Ershova N. V. 2016, Characteristics of the metallurgical production of Yurginsky Machine Plant OOO as a source of impact on the environment. *Mezhdunarodnyy studencheskiy nauchnyy vestnik* [International student scientific newsletter], no. 6. (*In Russ*.) URL: https://eduherald.ru/ru/article/view?id=16758
18. Dvurechensky V. G., Sokolov D. A., Toporovskaya A. A., Berlyakova O. G. 2011, Soil-ecological state of urbanized territories of Western Siberia. *Pochvovedeniye i agrokhimiya* [Soil science and agrochemistry], no. 2, pp. 5–13. (*In Russ*.)
19. Sidorenko A. S., Nozirzoda Sh. S. 2016, Assessment of the impact of metallurgical slags of YuMZ OOO on the state of the environment in the city of Yurga. Non-destructive testing: collection of works VI All-Russian scientific-practical conference. Tomsk, pp. 311–315. (*In Russ*.)
20. Stolboushkin A. Yu. 2019, Production of silicate materials with the addition of finely ground open-hearth slag. *Stroitel'nyye materialy* [Construction Materials], no. 8, pp. 26–32. (*In Russ*.) https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-773-8-26-32
21. Guman O. M., Dolinina I. A., Makarov A. B. 2002, Geoecological conditions of the area where the slag dump and sludge storage tank are located at the Serov Metallurgical Plant. *Izvestiya Ural'skoy gosudarstvennoy gorno geologicheskoy akademii* [News of the Ural State Mining and Geological Academy], issue 15, pp. 263–272. (*In Russ*.)
22. Zakharov A. V., Guman O. M., Makarov A. B., Antonova I. A., Lee T. I. 2014, Ecological state of the environment of ferrous metallurgy dumps. *Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta* [News of the Ural State Mining University], issue 3 (35), pp. 51–56. (*In Russ*.)
23. Ignatova A. M., Pushkin S. A., Naumov V. A. 2013, Geochemical study of technogenic formations of blast furnace and ferrovanadium production of the Chusovsky Metallurgical Plant for the purpose of electric arc petrurgical recycling. *Nauchno-tekhnicheskiy vestnik Povolzh'ya* [Scientific and technical bulletin of the Volga region], no. 5, pp. 173–179. (*In Russ*.)
24. Kapnin V. V., Gilmanov M. R., Polyakov N. S. 2018, Improvement of blast furnace smelting technology at the Chelyabinsk Metallurgical Plant. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoy i ekonomicheskoy informatsii* [Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information], vol. 1, no. 4, pp. 57–61. (*In Russ*.)
25. Potapov D. S., Potapov S. S. 2010, Mineralogy of ferrochrome production slags at the Chelyabinsk Electrometallurgical Plant. *Uspekhi sovremennogo yestestvoznaniya* [Advances of modern natural science], no. 8, pp. 23–25. (*In Russ*.)
26. Sokol E. V., Nigmatulina E. N., Nokhrin D. Yu. 2010, Dust emission of chromium from ferrochrome production slag storage areas. *Sibirskiy ekologicheskiy zhurnal* [Siberian Ecological Journal], vol. 17, no. 6, pp. 851–863. (*In Russ*.) http://elibrary.ru/item.asp?id=15603607
27. Gmyzina N. V., Sedinkina N. A., Gorlova O. E. 2019, Studying the properties of converter slags in order to improve the technology of their processing. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoy i ekonomicheskoy informatsii* [Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information], vol. 75, no. 5, pp. 623–631. (*In Russ*.) https://doi.org/10.32339/0135-5910-2019-5-623-631
28. Menshikova E. A., Blinov S. M., Bokov D. A., Zhakova U. V. 2009, Study of the possibility of using a substance from a steelmaking slag dump. Problems of mineralogy, petrography and metallogeny: scientific readings in memory of P. N. Chirvinsky, no. 12, pp. 317–319. (*In Russ*.)
29. Podolsky V. P., Kukina O. B., Sleptsova O. V. 2014, Analysis of the chemical and mineralogical composition of waste steelmaking converter slags. *Nauchnyy vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Ser.: Fiziko-khimicheskiye problemy i vysokiye tekhnologii stroitel'nogo materialovedeniya* [Scientific bulletin of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Ser.: Physico-chemical problems and high technologies of building materials science], no. 1, pp. 126–130. (*In Russ*.)
30. Parshina M. V. 2009, Influence of processes of hypergene metamorphization of technogenic massifs on the degree of their environmental hazard for the natural environment. *Zapiski Gornogo instituta* [Notes of the Mining Institute], vol. 180, pp. 33–35. (*In Russ*.)
31. Ponomareva P. V., Sycheva L. I. 2022, Influence of aluminate slags on the synthesis and properties of sulfomineral cement. *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii* [Advances in chemistry and chemical technology], vol. 36, no. 3 (252), pp. 123–126. (*In Russ*.) https://www.elibrary.ru/zekcye
32. Makarov A. B. 2019, Technogenic deposits of ferrous metals. *Regional problems of geology, geography, technosphere and environmental safety*. Orenburg, pp. 42–45. (*In Russ*.) https://www.elibrary.ru/nztwao
33. Makarov A. B., Osovetsky B. M., Antonova I. A. 2017, Magnetic spherules from soils near the slag dump of the Nizhny Tagil metallurgical plant. *Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta* [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
34. Bryzgalov S. V., Pugin K. G., Vaisman Ya. I., Maksimovich N. G., Kalinina E. V. 2009, Influence of locations of blast furnace metallurgical slag on environmental objects. *Otkhody: ekologiya, tekhnologiya, resursosberezheniye* [Waste: ecology, technology, resource conservation]. Moscow, pp. 35–39. (*In Russ*.)
35. Vasilyev A. A., Chashchin A. N. 2014, Features of spatial heterogeneity in the mapping of soil pollution with heavy metals. *Prirodoobustroystvo* [Environmental management], no. 2, pp. 25–29. (*In Russ*.)
36. Solovyov A. D., Shcherban M. G., Plotnikova M. D. 2020, Influence of technogenic and natural factors on the content of metal pollutants in medicinal plants of the Middle Urals. *Geograficheskiy vestnik* [Geographical Bulletin], no. 4 (55), pp. 152–165. (*In Russ*.) https://doi.org/10.17072/2079-7877-2020-4-152-165
37. Ustenko S. V., Egorova A. N., Zalevskaya Yu. M., Pugin K. G. 2016, Recultivation of waste heaps of the Kizelovsky coal basin with industrial waste. Ecology and scientific and technological progress. Urbanism: materials of the XIII All-Russian scientific-practical conference. Perm, vol. 1, pp. 360–365. (*In Russ*.)
38. Rybnikov P. A., Rybnikova L. S. 2016, Justification of the environmental safety of waste disposal in mined-out space. Ecological and techno-

sphere safety of mining regions: collection of works of the IV International scientific-practical conference. Yekaterinburg, pp. 322–329. (*In Russ*.)
39. Meshalkin V. P., Butusov O. B., Dovi V. J., Belozersky A. Yu., Chelnokov V. V. 2021, Assessment of the impact of chemical pollution from ferrous metallurgy enterprises on forests using satellite photographs. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya metallurgiya* [News of Universities. Ferrous metallurgy], vol. 64, no. 11, pp. 839–845. (*In Russ*.) https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-11-839-845
40. Likhachev S. V., Pimenova E. V., Zhakova S. N. 2019, Ecological conditions for the formation of a phytocenosis of a slag dump of a steel-making plant. Vestnik Irkutskiy gosudarstvennyy agrarnyy universitet [Vestnik Irkutsk State Agrarian University], issue 92, pp. 67–75. (*In Russ*.)
41. Zaitsev V. S. 2020, Analysis of environmental activities of enterprises in the mining and metallurgical industry using the example of the Cherepovets plant of PAO Severstal. *Ekonomika promyshlennosti* [Industrial Economics], vol. 13, no. 2, pp. 244–256. (*In Russ*.) https://doi.org/10.17073/2072-1633-2020-2-244-256
42. Vodyanitsky Yu. N., Bolshakov V. A., Sorokin S. E., Fateeva N. M. 1995, Technogeochemical anomaly in the zone of influence of the Cherepovets Metallurgical Plant. *Pochvovedenie* [Soil Science], no. 4, pp. 498–507. (*In Russ*.)
43. Ladonin D. V. 2017, Lanthanides in soils of the zone affected by the Cherepovets Metallurgical Plant. *Pochvovedenie* [Soil Science], no. 6, pp. 680–689. (*In Russ*.) https://doi.org/10.7868/80032180X17060041
44. Astafurova T. P., Zotikova A. P., Mikhailova S. I., Burenina A. A. 2015, Biological effects and mechanisms of influence of highly dispersed metallurgical waste on the morphological and physiological-biochemical parameters of agricultural plants. Plants under conditions of global and local natural, climatic and anthropogenic influences: abstract, report of the All-Russian scientific conference with international participation. Petrozavodsk, 45 p. (*In Russ*.) URL: http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Repository/vtls:000587134
45. Zibareva L. N., Zhilina O. V., Burenina A. A., Morgalev Yu. N. 2013, Study of the effects of highly dispersed metallurgical waste on the proline content in the leaves of agricultural plants. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education], no. 4, pp. 1–8. (*In Russ*.) URL: http://www.science-education.ru/pdf/2013/4/98.pdf
46. Parshina M. V., Korelsky D. S. 2008, Comprehensive monitoring of the impact of the Severonickel plant on the natural environment. *Zapiski Gornogo instituta* [Notes of the Mining Institute], vol. 174, pp. 217–221. (*In Russ*.)
47. Korneykova M. V., Evdokimova G. A. 2010, Gradient of microscopic fungal complexes in soils contaminated with heavy metals. *Modern problems of soil pollution*. Moscow, pp. 227–231. (*In Russ*.)
48. Stepanova L. P., Yakovleva E. V., Pisareva A. V. 2019, Spatiotemporal dynamics of soil-geochemical anomalies in the zone of influence of slag waste. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and industry of Russia], vol. 23, no. 3, pp. 44–48. (*In Russ*.) https://doi.org/10.18412/1816-0395-2019-3-44-48
49. Erokhin Yu. V., Zakharov A. V., Leonova L. V. 2020, Slags from the production of chromium cast iron at the Alapaevsky plant (composition and geoecology). *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal* [News from universities. Mining journal], no. 5, pp. 90–99. (*In Russ*.) https://doi.org/10.21440/0536-1028-2020-5-90-99

The article was received on December 19, 2023

УДК 622.234.573:551.762.2:553.982.2:004.048 http://doi.org/10.21440/2307-2091-2024-1-106-113

Снижение рисков при разработке трудноизвлекаемых запасов жидких углеводородов с использованием комплексного анализа геолого-промысловых данных

Руслан Альбертович ГИЛЯЗЕТДИНОВ*
Любовь Сергеевна КУЛЕШОВА**
Вячеслав Шарифуллович МУХАМЕТШИН**

Институт нефти и газа ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» в г. Октябрьском, Октябрьский, Республика Башкортостан, Россия

Аннотация

Актуальность работы обусловлена необходимостью реализации комплексного подхода к процессу вовлечения в разработку остаточных запасов нефти, сосредоточенных в низкопроницаемых и неоднородных коллекторах тюменской свиты, за счет учета результатов прикладного анализа геолого-промысловых данных с использованием методов математического анализа. В частности, дифференциация и группирование скважин по критерию эффективности в рамках приобщения ряда геологических и технико-технологических показателей позволяет устанавливать определенные закономерности изменения фильтрационно-емкостных характеристик зон, которые в дальнейшем могут быть использованы при формировании оптимальной стратегии воздействия на нефтенасыщенные участки залежи.

Цель исследования заключается в снижении уровня неопределенности при моделировании дизайна гидроразрыва пласта в условиях разработки перспективных залежей Шаимского нефтегазоносного района, характеризующихся сложным геологическим строением.

Методы исследования – методы распознавания образов, дискриминантный анализ, теория полного факторного эксперимента.

Результаты и выводы. При проведении анализа получены уравнения канонических дискриминантных функций, позволяющие существенно снизить риски принятия неэффективных управленческих решений в условиях неоднородности и неравновесности геолого-промысловой информации. С использованием теории полного факторного эксперимента получена общая линейная модель, связывающая ряд представленных геологических показателей между собой и уточняющая степень влияния их на эмерджентность нелинейных пластовых систем, что в рамках реализации проактивного регулирования процессов извлечения остаточных запасов нефти является существенно важным аспектом. Сделаны выводы о возможности синтеза результатов исследования и имеющихся научно-методических основ для формирования передового и компетентностного подхода к освоению трудноизвлекаемых запасов в рамках управления энергетическими ресурсами недропользователей.

***Ключевые слова*:** тюменская свита, неоднородные по структуре и поровому пространству геологические комплексы, дифференциация и группирование скважин, геолого-статистическое моделирование, гидроразрыв пласта, разработка залежей трудноизвлекаемых запасов.

Введение

В связи с повсеместным ухудшением структуры запасов нефти на крупных месторождениях Российской Федерации и их стремительным переходом в категорию трудноизвлекаемых ресурсов рентабельный процесс подъема на дневную поверхность жидких углеводородов невозможен без реализации комплекса геолого-технических мероприятий, позволяющих вовлечь в процесс дренирования застойные, тупиковые и слабо охваченные воздействием зоны продуктивных пластов [1]. При продолжительной разработке месторождения в пласте формируются техногенные неоднородности, которые в симбиозе с естественной нелинейной трещиноватостью низкопроницаемого порового пространства приводят к неравномерной выработке эксплуатационных объектов. Одним из эффективных и оправданных методов интенсификации притока в низкопродуктивных залежах является гидроразрыв пласта.

В отечественной практике накоплен большой опыт моделирования процессов ГРП, в частности, формирования оптимального дизайна и определения возможных технико-экономических результатов планируемых обработок. Начальным звеном для описания любого из про-

✉gilyazetdinov_2023@mail.ru
https://orcid.org/0009-0002-1931-7035
**vsh@of.ugntu.ru

цессов служит массив промысловых данных различных категорий, в которых выделен численный показатель, отнесенный к тому или иному рассматриваемому параметру [2]. Основная механика моделирования стадий интенсификации добычи нефти при помощи ГРП реализуется с использованием математических инструментов, которые позволяют качественно выполнять прогноз и минимизировать неопределенности только при корректно подготовленных входных данных, что не всегда удается в силу различных факторов. Одним из них является то, что недропользователи подходят к стадии планирования операции ГРП без предварительной обработки накопленной информации по месторождению или объектам-аналогам, позволяющей, в свою очередь, при правильной постановке задачи заблаговременно выявить ключевые аспекты и особенности моделирования сложных нелинейных и неструктурированных систем [3]. В рамках этого наиболее оптимальным методом снижения уровня неопределенности при принятии качественных управленческих решений является реализация комплексного подхода к процессу использования регрессионных моделей, полученных в рамках повсеместного учета параметров, характеризующих ряд технико-технологических и геологических аспектов процесса. Это позволит в условиях различной по плотности информации обоснованно подходить к вопросу формирования оптимальной стратегии извлечения трудноизвлекаемых запасов нефти.

Методология

Для повышения достоверности прогнозирования результатов ГРП в сложных геологических комплексах важно повсеместно использовать накопленный опыт по объектам-аналогам. Согласно этому, в качестве базового метода для реализации эффективного подхода к вопросу обеспечения представительности информации является применение методов распознавания образов, в частности, дискриминантного анализа (ДА). Он нашел широкое применение для решения различного круга задач разработки месторождений. Так, в работах [4, 5] при помощи ДА получены представительные геолого-статистические модели по залежам Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции в зависимости от тектонико-стратиграфической приуроченности объектов. Помимо этого, при помощи вспомогательных инструментов существенно повышена точность поиска объектов-аналогов при различном количественно-качественном соотношении промысловых данных, что позволяет сделать следующие выводы:

– применение ДА в рамках поставленной задачи совершенствования подходов к процессу моделирования ГРП может существенно повысить качество прикладных и практических работ;

– распределение скважин в осях канонических дискриминантных функций позволяет наглядно увидеть область их рассеивания относительно центроидов каждой из групп;

– полученные геолого-статистические модели могут выступить в виде вектора направления для поиска оптимального подхода к вопросу прогнозирования эффективности ГРП в рамках разработки низкопроницаемых коллекторов тюменской свиты.

В качестве объекта исследования выделим залежи средней юры одного из месторождений Шаимского нефтегазоносного района, более половины запасов которого сосредоточены в низкопроницаемых коллекторах пластов тюменской свиты T_1, T_2, T_3, объединенных в единый эксплуатационных объект Т. Основной объем добычи жидких углеводородов приходится на пласт T_2(64 %), оставшаяся часть – на пласты T_1(27 %) и T_3(9 %). Перспектива сохранения и увеличения текущего тренда добычи нефти лежит в области повсеместного вовлечения в разработку трудноизвлекаемых запасов залежей T_1 и T_3 в большей мере и регулирования процесса отбора нефти из залежи T_2 при помощи реализации различных геолого-технических мероприятий.

Таблица 1. Комплекс параметров для проведения дискриминантного анализа по объекту исследования
Table 1. Set of parameters for discriminant analysis on the object of study

Категория параметров	Параметры	Минимальное значение	Максимальное значение	Абсолютное отклонение
Техническая	Масса проппанта *m*, т	12	49	11,288
	Удельная масса проппанта m^*, т/м	2	10	2,559
	Концентрация проппанта *x*, кг/м^3	978	1205	63,541
	Темп закачки проппанта *t*, м^3/мин	1	4	1,101
Технологическая	Накопленная добыча жидкости $\Sigma Q_ж$, тыс. т/скв.	9	453,2	129,265
	Накопленная добыча нефти $\Sigma Q_ж$, тыс. т/скв.	7	69	17,516
	Дебит жидкости до ГРП $Q_ж$, т/сут	3,6	150	41,998
	Дебит нефти до ГРП $Q_н$, т/сут	1	14	3,978
	Обводненность до ГРП *W*, %	11	98,4	22,754
Геологическая	Эффективная толщина *h*, м	2	12,7	1,914
	Эффективная нефтенасыщенная толщина $h_{эф}$, м	2	6,7	0,911
	Проницаемость *k*, мкм^2	0,2	273	101,3
	Расчлененность *n*, ед.	3	21	8

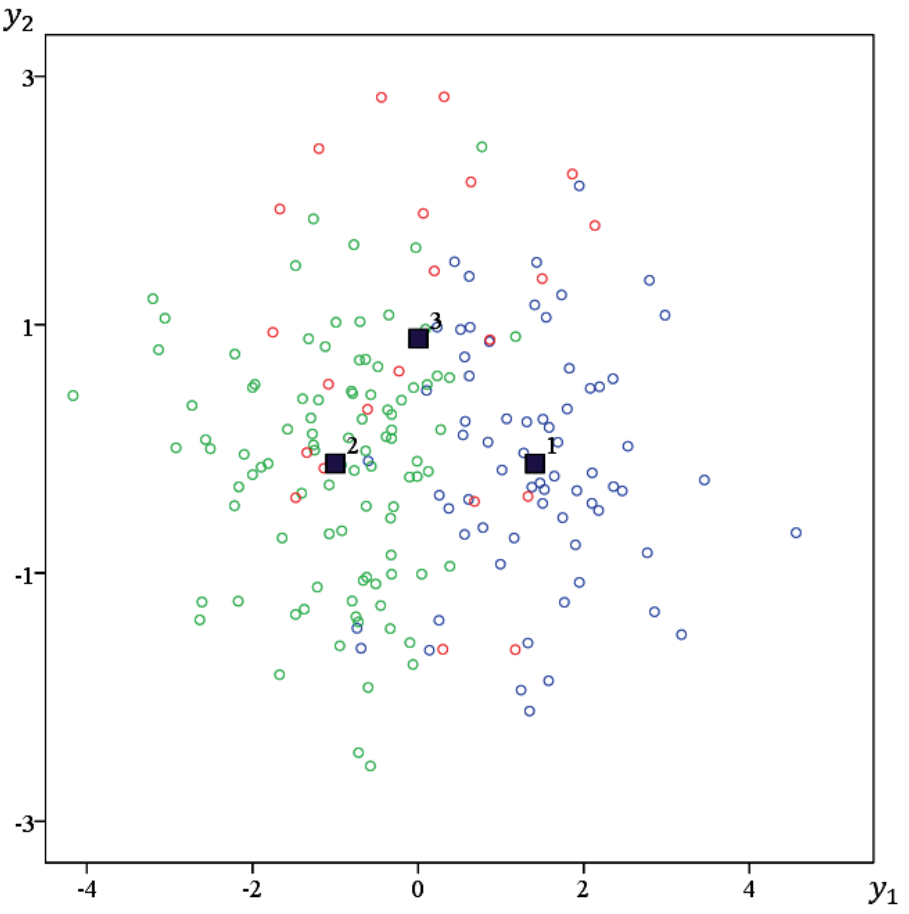


Рисунок 1. Распределение скважин с ГРП по критерию эффективности в осях канонических дискриминантных функций: объекты группы скважин: ■ – центроид группы; *1,2,3* – наименование группы скважин; ○ – с высокой эффективностью после ГРП; ○ – со средней эффективностью после ГРП; ○ – с низкой эффективностью после ГРП

Figure 1. Distribution of wells with hydraulic fracturing according to the efficiency criterion in the axes of canonical discriminant functions: ■ – the centroid of the group; *1,2,3* – name of the well group; ○ – with high efficiency after hydraulic fracturing; ○ – with average efficiency after hydraulic fracturing; ○ – with low efficiency after hydraulic fracturing

Исходными данными для проведения моделирования выступила геолого-промысловая информация по более чем 150 операциям ГРП. База данных по исследуемому объекту включала в себя информацию геологического и технико-технологического характера, комплекс параметров для отражения которых выбирался с учетом следующих условий [6, 7]:

– широкое использование их при планировании и моделирование ГРП;

– простота определения на различных стадиях разработки месторождения [8];

– возможность регулирования ряда параметров на различных этапах проектирования операции;

– относительная представительность параметров, подтвержденная промысловыми исследованиями.

В табл. 1 представлены используемые параметры и их статистические показатели.

С учетом того что эффективность ГРП на скважинах месторождения различна в связи с неравномерной нефтенасыщенностью, перемежающейся расчлененностью и неоднородностью по проницаемости эксплуатационного объекта, включающего в себя три продуктивных пласта, введем комплексный эмпирический критерий $\ln \frac{Q_{\text{нефти}}\text{до ГРП}}{Q_{\text{нефти}}\text{после ГРП}} = z$, характеризующий эффективность ГРП, и проведем процедуру дифференциации и группирования скважин. Так, распределение их по заданному показателю происходит при следующих граничных значениях (рис. 1):

– для 1-й группы при $z < -0{,}9$ (ГРП высокой эффективности);

– для 2-й группы при $-0{,}9 \le z \le -0{,}5$ (ГРП средней эффективности);

– для 3-й группы при $z > -0{,}5$ (ГРП низкой эффективности).

Процент верно сгруппированных скважин по эмпирическому критерию эффективности ГРП составил более 75 %. Исходя из результатов построения области рассеивания групп, можно выделить, что при планировании ГРП в условиях анализируемого месторождения или объекта-аналога установить приуроченность скважин к той или иной группе можно по полученным формулам канонических дискриминантных функций:

Таблица 2. Матрица планирования по геологическим параметрам объектов тюменской свиты
Table 2. Planning matrix for geological parameters of objects of the Tyumen formation

N	h	$h_{эф}$	k	n	$\tilde{x}_0$	$\tilde{x}_1$	$\tilde{x}_2$	$\tilde{x}_3$	$\tilde{x}_4$	$\tilde{x}_1\tilde{x}_2$	$\tilde{x}_1\tilde{x}_3$	$\tilde{x}_1\tilde{x}_4$	$\tilde{x}_2\tilde{x}_3$	$\tilde{x}_2\tilde{x}_4$	$\tilde{x}_3\tilde{x}_4$	y
1	2	2	0,2	3	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	3,1
2	12,7	2	0,2	3	+1	–1	+1	+1	+1	–1	–1	–1	+1	+1	+1	2,4
3	2	6,7	0,2	3	+1	+1	–1	+1	+1	–1	+1	+1	–1	–1	+1	5,3
4	12,7	6,7	0,2	3	+1	–1	–1	+1	+1	+1	+1	–1	–1	–1	+1	0,47
5	2	2	273	3	+1	+1	+1	–1	+1	+1	–1	+1	–1	+1	–1	20,4
6	12,7	2	273	3	+1	–1	+1	–1	+1	–1	–1	–1	–1	+1	–1	5,3
7	2	6,7	273	3	+1	+1	–1	–1	+1	–1	–1	+1	+1	–1	–1	11,2
8	12,7	6,7	273	3	+1	–1	–1	–1	+1	+1	–1	–1	+1	–1	–1	0,99
9	2	2	0,2	21	+1	+1	+1	+1	–1	+1	+1	–1	+1	–1	–1	0,27
10	12,7	2	0,2	21	+1	–1	+1	+1	–1	–1	–1	+1	+1	–1	–1	7,3
11	2	6,7	0,2	21	+1	+1	–1	+1	–1	–1	+1	–1	–1	+1	–1	1,4
12	12,7	6,7	0,2	21	+1	–1	–1	+1	–1	+1	–1	+1	–1	+1	–1	3,2
13	2	2	273	21	+1	+1	+1	–1	–1	+1	–1	–1	–1	–1	+1	2,9
14	12,7	2	273	21	+1	–1	+1	–1	–1	–1	+1	+1	–1	–1	+1	0,2
15	2	6,7	273	21	+1	+1	–1	–1	–1	–1	–1	–1	+1	+1	+1	4,4
16	12,7	6,7	273	21	+1	–1	–1	–1	–1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	3

$$y_1 = -0,627\,m - 0,087\,m^* + 0,082\,x - 0,555\,t + \\ + 0,653\sum Q_{ж} - 0,385\sum Q_{н} + 0,072\,Q_{ж} + 0,096\,Q_{н} + \\ + 0,819\,W + 0,072\,h - 0,118\,h_{эф} + 0,244\,k - 0,112\,n; \quad (1)$$

$$y_2 = 0,085\,m + 0,046\,m^* - 0,205\,x + 0,264\,t + \\ + 0,413\sum Q_{ж} - 0,109\sum Q_{н} - 0,535\,Q_{ж} - 0,491\,Q_{н} + \\ + 0,002\,W + 0,041\,h + 0,084\,h_{эф} + 0,150\,k + 0,450\,n. \quad (2)$$

Это позволит заметно упростить процедуру обработки данных в условиях различной по плотности геолого-промысловой информации и в евклидовом пространстве оценить близость объекта к тому или иному центроиду [9, 10].

После сопоставления результатов группирования скважин по критерию эффективности с данными интерпретации проведенных геофизических исследований после ГРП на выделенных участках по скважинам наблюдаются определенные закономерности, указывающие на достаточно высокую степень достоверности полученных результатов. Зона, в которой расположены скважины первой группы, характеризуется преобладанием притока p, приходящегося на пласты T_2 и $T_1 + T_2$ с лучшими фильтрационно-емкостными характеристиками, причем

$$p_{T2} > p_{T1+T2}, \quad (3)$$

где p_{T2} – доля притока, которая приходится на пласт T_2; p_{T1+T2} – доля притока при совместной эксплуатации пластов T_1 и T_2.

Для зоны, сформированной второй группой, наиболее вовлеченными в процесс эксплуатации являются пласты T_1 и $T_1 + T_2 + T_3$ с учетом того, что:

$$p_{T1} < p_{T1+T2+T3}, \quad (4)$$

где p_{T1} – доля притока, которая приходится на пласт T_1; $p_{T1+T2+T3}$ – доля притока при совместной эксплуатации пластов T_1, T_2, T_3.

Для третьей зоны основная доля притока характерна для пласта T_3 с худшими коллекторскими параметрами, что подтверждается относительно невысоким приростом дебитов после воздействия.

Представленные зависимости (3–4) подтверждаются еще и тем, что в осях канонических дискриминантных функций для каждой из групп характерна миграция той или иной скважины, т. е., например, отнесение ее к категории высокой продуктивности при незначительных промысловых реальных результатах. Это обусловлено неоднородностью и неравновесностью исходных данных, в частности, по ряду геологических критериев, в результате чего образуется зона неопределенности для каждой из групп объектов при использовании математического аппарата. Для решения задачи совершенствования научно-методических подходов к вопросу группирования скважин по различным критериям введем параметр опти-

мизации y, который позволит существенно снизить риск принятия управленческих решений путем повышения количественно-качественной характеристики модели на основе различных статистических инструментов [11]. В качестве одного из них используем теорию полного факторного эксперимента. Конечным результатом исследования выступит линейная математическая модель уравнения регрессии с взаимодействием на основе четырех параметров, причем для расчетов они будут представлены в виде интервала их варьирования в силу невозможности объективной и реальной оценки рассматриваемых показателей из-за ряда особенностей объекта исследования [12]:

– незначительной накопленной базы данных по проведенным промысловым исследованиям;

– высокого уровня зашумленности данных;

– значительного уровня корреляции между собой геолого-промысловых параметров;

– невозможности использования разнородной информации для принятия качественных управленческих решений.

Результаты

Матрица планирования первого порядка представлена в табл. 2 и состоит из четырех факторов при количестве элементов $N = 16$. Помимо перечня геологических параметров представлены также значения, используемые в кодированной системе координат $\tilde{x}_i$. В качестве параметров оптимизации y_i для шестнадцати элементов использованы значения четырех рассматриваемых параметров, которые в рамках проведения ДА были отнесены к другим группам (рис. 1).

С учетом того, что требования для матрицы плана соблюдены, получим

$$b_{ij} = \frac{\sum\left(\tilde{x}_i \tilde{x}_j\right) y_N}{N}, \quad (5)$$

где b_{ij} – коэффициент регрессии того или иного значения в кодированной системе координат; y_N – параметр оптимизации, соответствующий одному из элементов N (табл. 2); N – количество элементов матрицы, и рассчитаем коэффициенты регрессии по формуле (5) [13].

Полученное уравнение линейной модели с взаимодействием в кодированной системе координат преобразуем в натуральную при помощи формулы (6):

$$x_j^0 = \frac{x_{j\max} x_{j\min}}{2}, \quad (6)$$

где x_j^0 – значение нулевого уровня для j-го параметра (столбцы 2–5, табл. 2); $x_{j\min}$, $x_{j\max}$ – максимальное и минимальное значения j-го параметра, и формулы (7):

$$\Delta\tilde{x}_j = \frac{x_{j\max} x_{j\min}}{2}, \quad (7)$$

где $\Delta\tilde{x}_j$ – значение для j-го параметра в кодированной системе координат.

С использованием исходных формул вычислим математическую модель линейного уравнения с взаимодействием для комплекса геологических параметров по объектам Шаимского нефтегазоносного района:

$$y = 1363 - 5{,}66\,h + 1{,}098\,h_{эф} - 2{,}031\,k - 0{,}09\,n + 61\,hh_{эф} - 0{,}544\,hk + 1{,}1\,hn - 0{,}01\,h_{эф}k + 0{,}113\,h_{эф}n + 0{,}99\,kn. \quad (8)$$

Использование модели (8) позволяет как существенно снизить уровень неопределенности при планировании ГРП в коллекторах тюменской свиты, так и эффективно осуществлять контроль и регулирование процессов вовлечения в разработку зон с наиболее благоприятными геологическими параметрами.

Выводы

В результате обработки данных более чем 150 операций ГРП на одном из месторождений Шаимского нефтегазоносного района получены следующие выводы:

– группирование скважин по предложенному критерию эффективности на основе комплекса геологических и технико-технологических параметров позволяет косвенно идентифицировать зоны с ухудшенными фильтрационно-емкостными свойствами, что на определенном уровне достоверности подтверждается результатами геофизических исследований скважин [14, 15];

– использование полученных в ходе ДА уравнений КДФ (1–2) способствует достаточно эффективному поиску объектов-аналогов в ходе подготовки и моделирования процессов ГРП;

– применение полученной линейной модели с взаимодействием на основе ряда геологических параметров оптимизирует алгоритмы разработки месторождений с трудноизвлекаемыми запасами в условиях недостаточной по плотности и количественно-качественному соотношению геолого-промысловой информации.

Представленный в работе системный подход к обработке промысловых данных с использованием математического аппарата может быть успешно применен в рамках решения задач проактивного управления ресурсами жидких углеводородов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мухаметшин В. В., Кулешова Л. С. О снижении уровня неопределенности при управлении заводнением залежей с трудноизвлекаемыми запасами // Известия ТПУ. Инжиниринг георесурсов. 2020. Т. 331. № 5. С. 140–146. https://doi.org/10.18799/24131830/2020/5/2644

2. Yakupov R. F., Mukhametshin V. Sh., Tyncherov K. T. Filtration model of oil coning in a bottom water-drive reservoir // Periódico Tchê Química. 2018. Vol. 15. Iss. 30. P. 725–733. https://doi.org/10.52571/PTQ.v15.n30.2018.725

3. Мухаметшин В. Ш. Экспресс-оценка коэффициента извлечения нефти при разработке залежей в карбонатных коллекторах на естественных режимах // SOCAR Proceedings. 2022. Спец. вып. 1. С. 27–36. https://doi.org/10.5510/OGP2022SI100642

4. Мухаметшин В. В., Андреев В. Е. Повышение эффективности оценки результативности технологий, направленных на расширение использования ресурсной базы месторождений с трудноизвлекаемыми запасами // Известия ТПУ. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329. № 8. С. 30–36.

5. Kozikhin R. A., Daminov A. M., Fattakhov I. G., Kuleshova L. S., Gabbasov A. Kh. Identifying the efficiency factors on the basis of evaluation of acidizing of carbonate reservoirs // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018. Vol. 194. No. 6. Article number 062013. P. 1-6. https://doi.org/10.1088/1755-1315/194/6/062013

6. Xie X., Lu H., Deng H., Yang H., Teng B., Li H. A. Characterization of unique natural gas flow in fracture-vuggy carbonate reservoir: A case study on Dengying carbonate reservoir in China // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2019. Vol. 182 (02). Article number 106243. https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106243
7. Li Z., Zhong Z., Cao X., Hou B., Li L. Robustness analysis of shield tunnels in non-uniformly settled strata based on fuzzy set theory // Computers and Geotechnics. 2023. Vol. 162. Article number 105670. https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2023.105670
8. Евсюткин И. В., Марков Н. Г. Глубокие искусственные нейронные сети для прогноза значений дебитов добывающих скважин // Известия ТПУ. Инжиниринг георесурсов. 2020. Т. 331. № 11. С. 88–95. https://doi.org/10.18799/24131830/2020/11/2888
9. Zhu Z., Liu Z., Mi F., Sang S. Reservoir pressure prediction using time-lapse seismic multi-attribute analysis // SEG Technical Program Expanded Abstracts. 2013. P. 5036–5040. https://doi.org/10.1190/segam2013-1436.1
10. Wen X., Yang J., Geng S., Li K. Study on new method for evaluating reservoir formation pressure by wellhead pressure // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 384. Article number 012037. https://doi.org/10.1088/1755-1315/384/1/012037
11. Yu T., Li B., Lei Z., An X., Wang W., Jiao J., Hou J., Bo X. Economic analysis and risk management in development of tight-low permeability reservoir // SPE/IATMI Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition (Bali, Indonesia, October 29–31, 2019). https://doi.org/10.2118/196345-MS
12. Sorin A. G., Popescu C. Quantifying economic uncertainties and risks in the oil and gas industry // Recent Applications of Financial Risk Modelling and Portfolio Management. 2021. Ch. 8. P. 154–184. https://doi.org/10.4018/978-1-7998-5083-0.ch008
13. Malyarenko A. M., Bogdan V. A., Blinov S. A., Kotenev Yu. A., Mukhametshin V. Sh., Kotenev M. Yu. Improving the reliability of determining physical properties of heterogeneous clay reservoir rocks using a set of techniques // Journal of Physics: Conference Series (IPDME-2020 – International Conference on Innovations, Physical Studies and Digitalization in Mining Engineering). 2021. Vol. 1753. P. 1–12. Article number 012074. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1753/1/012074
14. Мухаметшин В. В. Повышение эффективности управления разработкой залежей Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции на основе дифференциации и группирования // Геология и геофизика. 2021. Т. 62. № 12. С. 1672–1685. https://doi.org/10.15372/GiG2021102
15. Мухаметшин В. Ш., Хакимзянов И. Н. Особенности группирования низкопродуктивных залежей нефти в карбонатных коллекторах для рационального использования ресурсов в пределах Урало-Поволжья // Записки Горного института. 2021. Т. 252. С. 896–907. https://doi.org/10.31897/PMI.2021.6.11

Статья поступила в редакцию 24 ноября 2023 года

UDC 622.234.573:551.762.2:553.982.2:004.048 http://doi.org/10.21440/2307-2091-2024-1-106-113

Risk reduction in the development of hard-to-recover liquid hydrocarbon reserves using a comprehensive analysis of geological and field data

Ruslan Al'bertovich GILYAZETDINOV*
Lyubov Sergeevna KULESHOVA**
Vyacheslav Sharifullovich MUKHAMETSHIN**

Institute of Oil and Gas of the Ufa State Petroleum Technical University in Oktyabrsky, Oktyabrsky, Republic of Bashkortostan, Russia

Abstract

The relevance of the work is due to the need to implement an integrated approach to the process of involving in the development of residual oil reserves concentrated in low-permeability and heterogeneous reservoirs of the Tyumen suite, by taking into account the results of applied analysis of geological and field data using mathematical analysis methods. In particular, differentiation and grouping of wells according to efficiency criteria within the framework of introducing a number of geological and technical-technological indicators makes it possible to establish certain patterns of changes in the filtration and capacitance characteristics of zones, which can subsequently be used in the formation of an optimal strategy for influencing oil-saturated areas of the deposit.

The purpose of the study is to reduce the level of uncertainty when modeling the design of hydraulic fracturing in the conditions of developing promising deposits of the Shaim oil and gas region, characterized by a complex geological structure.

Research methods. Pattern recognition methods, discriminant analysis, theory of a full factorial experiment.

Results and Conclusions. During the analysis, equations of canonical discriminant functions were obtained, which make it possible to significantly reduce the risks of making ineffective management decisions in conditions of heterogeneity and disequilibrium of geological and field information. Using the theory of a full factorial experiment, a general linear model was obtained that connects a number of presented geological indicators with each other and specifies the degree of their influence on the emergence of nonlinear reservoir systems, which is an essential aspect in the implementation of proactive regulation of the processes of extraction of residual oil reserves. Conclusions are drawn about the possibility of synthesizing the research results and the existing scientific and methodological foundations for the formation of an advanced and competence-based approach to the development of hard-to-recover reserves as part of the management of energy resources of subsoil users.

Keywords: Tyumen suite, geological complexes heterogeneous in structure and pore space, differentiation and grouping of wells, geological and statistical modeling, hydraulic fracturing, development of hard-to-recover reserves.

REFERENCES

1. Mukhametshin V. V., Kuleshova L. S. 2020, On reducing the level of uncertainty in the management of flooding of deposits with hard-to-recover reserves. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering], vol. 331, no. 5, pp. 140–146. https://doi.org/10.18799/24131830/2020/5/2644
2. Yakupov R. F., Mukhametshin V. Sh., Tyncherov K. T. 2018, Filtration model of oil coning in a bottom water-drive reservoir. *Periódico Tchê Química*, vol. 15, issue 30, pp. 725–733. https://doi.org/10.52571/PTQ.v15.n30.2018.725
3. Mukhametshin V. Sh. 2022, Express assessment of the oil recovery coefficient during the development of deposits in carbonate reservoirs under natural conditions. *SOCAR Proceedings*, special issue 1, pp. 27–37. https://doi.org/10.5510/OGP2022SI100642
4. Mukhametshin V. V., Andreev V. E. 2018, Improving the efficiency of evaluating the effectiveness of technologies aimed at expanding the use of the resource base of deposits with hard-to-recover reserves. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering], vol. 329, no. 8, pp. 30–36.
5. Kozikhin R. A., Daminov A. M., Fattakhov I. G., Kuleshova L. S., Gabbasov A. Kh. 2018, Identifying the efficiency factors on the basis of evaluation of acidizing of carbonate reservoirs. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, vol. 194, no. 6, article number 062013. P. 1–6. https://doi.org/10.1088/1755-1315/194/6/062013
6. Xie X., Lu H., Deng H., Yang H., Teng B., Li H. A. 2019, Characterization of unique natural gas flow in fracture-vuggy carbonate reservoir: A case study on Dengying carbonate reservoir in China. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, vol. 182 (02), article number 106243. https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106243
7. Li Z., Zhong Z., Cao X., Hou B., Li L. 2023, Robustness analysis of shield tunnels in non-uniformly settled strata based on fuzzy set theory. *Computers and Geotechnics*, vol. 162, article number 105670. https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2023.105670

✉gilyazetdinov_2023@mail.ru
https://orcid.org/0009-0002-1931-7035
**vsh@of.ugntu.ru

8. Evsyutkin I. V., Markov N. G. 2020, Deep artificial neural networks for forecasting the production well flow rates. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering], vol. 331, no. 11, pp. 88–95. https://doi.org/10.18799/24131830/2020/11/2888
9. Zhu Z., Liu Z., Mi F., Sang S. 2013, Reservoir pressure prediction using time-lapse seismic multi-attribute analysis. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, pp. 5036–5040. https://doi.org/10.1190/segam2013-1436.1
10. Wen X., Yang J., Geng S., Li K. Study on new method for evaluating reservoir formation pressure by wellhead pressure. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, vol. 384, article number 012037. https://doi.org/10.1088/1755-1315/384/1/012037
11. Yu T., Li B., Lei Z., An X., Wang W., Jiao J., Hou J., Bo X. 2019, Economic analysis and risk management in development of tight-low permeability reservoir. SPE/IATMI Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition (Bali, Indonesia, October 29–31, 2019). https://doi.org/10.2118/196345-MS
12. Sorin A. G., Popescu C. 2021, Quantifying economic uncertainties and risks in the oil and gas industry. *Recent Applications of Financial Risk Modelling and Portfolio Management*, ch. 8, pp. 154–184. https://doi.org/10.4018/978-1-7998-5083-0.ch008
13. Malyarenko A. M., Bogdan V. A., Blinov S. A., Kotenev Yu. A., Mukhametshin V. Sh., Kotenev M. Yu. 2021, Improving the reliability of determining physical properties of heterogeneous clay reservoir rocks using a set of techniques. *Journal of Physics: Conference Series (IPDME-2020 – International Conference on Innovations, Physical Studies and Digitalization in Mining Engineering)*, vol. 1753, pp. 1–12, article number 012074. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1753/1/012074
14. Mukhametshin V. V. 2021, Improving the efficiency of managing the development of deposits of the West Siberian oil and gas province on the basis of differentiation and grouping. *Geologiya i geofizika* [Geology and geophysics], vol. 62, no. 12, pp. 1672–1685. https://doi.org/10.15372/GiG2021102
15. Mukhametshin V. Sh., Khakimzyanov I. N. 2021, Features of grouping of low-productive oil deposits in carbonate reservoirs for rational use of resources within the Ural-Volga region. *Journal of Mining Institute*, vol. 252, pp. 896–907. https://doi.org/10.31897/PMI.2021.6.11

The article was received on November 24, 2023

УДК 622.01+65.011.56 http://doi.org/10.21440/2307-2091-2024-1-114-120

Анализ степени зарастания нарушенных земель при добыче стройматериалов в условиях степной зоны Монголии

Долгорсурэн БАТЖАРГАЛ*
Борис Леонидович ТАЛЬГАМЕР**
Борис Николаевич ОЛЗОЕВ***
Александр Юрьевич БОЛОТНЕВ****

Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

Аннотация

Введение. В степных зонах Монголии восстановительные функции природного ландшафта представлены слабо, что определяется рядом факторов – горным климатом, незначительными осадками, частыми ветрами и бедной растительностью. При исследовании воздействия горных работ на ландшафт степей необходима оценка динамики восстановления растительности после проведения рекультивационных мероприятий.

Целью исследования является оценка степени зарастания рекультивированной поверхности кустарниковой растительностью в степной зоне Монголии.

Методика проведения исследований. Для оценки площади нарушенной горными работами поверхности использовались космические снимки, сделанные в период с 2014 по 2021 г. В результате полевых наблюдений и использования снимков установлено, что на этапе горнотехнической рекультивации выполнены выполаживание бортов карьера и нарезка борозд. На биологическом этапе рекультивации осуществлялась посадка кустарниковой растительности в ямы и борозды на спланированной поверхности. Для комплексного изучения степени зарастания применены разновременные индексные изображения вегетационного состояния местности. Использован индекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), который определяется по значениям яркостей снимка. Для детального изучения степени самозарастания нарушенной поверхности в августе 2019 и 2022 гг. проведены полевые исследования, во время которых осуществлялась оценка степени зарастания участков кустарниковой растительностью.

Результаты и их анализ. Установлено, что по состоянию на 2014 г. значения NDVI составляют от 0,08 до 0,16. В 2021 г. значения NDVI возросли и находятся в пределах 0,16–0,32. Наибольшие значения индекса NDVI приурочены к варианту посадки кустов в борозды на склоне карьера, индекс достигает 0,32.

Выводы. В результате полевых исследований установлено, что использование гребней (борозд) и создание ям на этапах лесохозяйственной рекультивации позволяет удерживать (сохранять) влагу в почвенном покрове, что дает положительные результаты восстановления растительности даже в условиях степной зоны Монголии.

***Ключевые слова*:** степная зона, нарушенные земли, рекультивация, космические снимки, индекс NDVI.

Введение

В степных зонах Монголии природные условия характеризуются горным климатом, незначительными осадками, частыми ветрами и бедной растительностью.

Помимо климата негативное влияние на развитие растительности оказывают горные работы, площадь ведения которых ежегодно увеличивается [1–3]. Деятельность горных предприятий приводит к загрязнению воздуха пылью, понижению его влажности, происходит деградация почвенного покрова и растительности [4, 5]. Уничтожение растительности приводит к ветровой эрозии почвы [5]. Для минимизации вредных факторов от горных работ выполняется рекультивация нарушенных земель [2, 4–6].

Восстановлением нарушенных земель на территории Монголии в основном занимаются крупные компании, такие как «Бороо Голд», «Монполимет», «Багануур» и др. [7, 8], которые ведут добычу золота и угля. Помимо добычи угля и золота на территории страны ведутся работы по добыче строительных материалов. Добытое сырье используется при строительстве дорог и зданий. Располагаются карьеры по добыче песка или строительного камня, как правило, вблизи от города и оказывают негативное влияние на экологическую обстановку [7–9]. Месторождения имеют небольшие запасы полезного ископаемого и короткие сроки отработки, по истечении которых карьеры обычно оставляют в заброшенном состоянии.

Объектом исследования являются отработанные карьеры по добыче строительных материалов, расположенные вблизи г. Улан-Батор. На рис. 1 показано расположение карьера по добыче строительных материалов вблизи

✉doogii.do@mail.ru
**talgamer@ex.istu.edu
***bnolzoev@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0001-7105-6341
****abolotnev@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-4250-6216

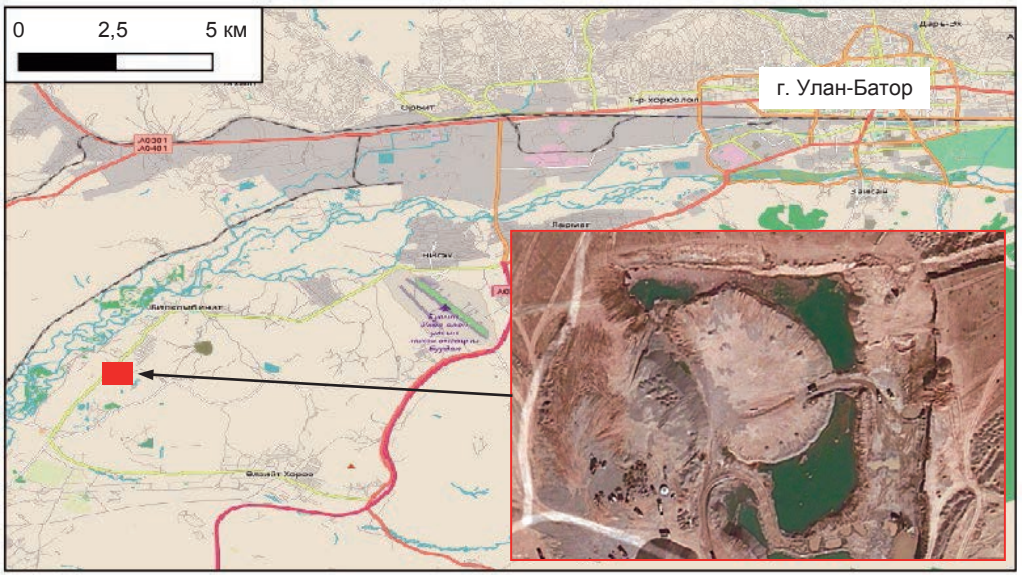


Рисунок 1. Местоположение эталонного участка, нарушенного горными работами (по состоянию местности на 2013 г.)
Figure 1. Location of the reference site disturbed by mining (as of the state of the area in 2013)

черты города по состоянию на 2014 г. Разработка данного карьера осуществлялась в 2005–2014 гг.

Материалы и методы исследований

Для изучения степени самозарастания нарушенных земель использованы сканерные космические снимки серии Landsat-7 и Landsat-8 [10], полученные в августе 2014 и 2021 гг. с учетом минимального значения облачности (до 10 %). Август в Монголии характеризуется преимущественно высокими значениями вегетации растений. Использование разновременных информационных ресурсов дистанционного зондирования для исследования отработанных открытым способом участков месторождений дает положительные результаты [2, 6, 11].

Анализ космических снимков проведен в двух направлениях: визуальное описание состояния растительности и изучение разновременных индексных изображений вегетационного состояния местности, составленных по космоснимкам.

Помимо анализа космических снимков проведены полевые исследования на данном участке карьера, во время которых был выполнен отбор проб почвы, изучена плотность растений в зависимости от уклона и экспозиции поверхности, измерены углы наклона поверхности, описаны ландшафтные условия местности.

Результаты исследования и их обсуждение

После отработки карьера, завершившейся в 2014 г., на исследуемом объекте проведены горнотехнический и биологический этапы рекультивации в лесохозяйственном направлении.

Исходя из визуального описания космического снимка по дешифровочным признакам (форме и размеру элементов борозд и ям, цвету и тени, полосчатой структуры выровненной поверхности) установлено, что на этапе горнотехнической рекультивации выполнено выполаживание бортов карьера и нарезка борозд. На биологическом этапе рекультивации – посадка кустарниковой растительности в ямы и борозды на спланированной поверхности (рис. 2, *а*).

Для исследования степени самозарастания участков рекультивации был взят эталон в форме треугольника, включающий три варианта посадки кустов (рис. 2): зона 1 – ямы на горизонтальном участке; зона 2 – ямы на склоне карьера; зона 3 – борозды на склоне карьера. В табл. 1 приведены площади участков рекультивации в зависимости от варианта посадки кустов.

На снимке карьера 2014 г. (рис. 2, *а*) заметны гребни, ямы и посаженные в них кустарники. Из снимка 2021 г. (рис. 2, *б*) видны успешные результаты лесохозяйственной рекультивации: кустарники разрослись на большей площади рекультивированного участка. Для комплексного изучения степени самозарастания применены разновременные индексные изображения вегетационного состояния местности. Наиболее распространенным индексом, вычисляемым по значениям яркостей снимка, является Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), который показывает состояние растений, с его помощью находят активную биомассу растений [2, 12–16]. Значения индекса NDVI варьирует в диапазоне от минус до плюс единицы. Положительные значения индекса NDVI характерны для покрытых растительностью поверхностей, нулевое и отрицательные значения – для воды, снега и льда.

В рассматриваемом случае были созданы индексные изображения NDVI на 2014 и 2021 гг. (рис. 3). Расчет индекса NDVI производился по формуле:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED},$$

где NIR – значения яркостей в ближней инфракрасной зоне; RED – значения яркостей в красной зоне видимого диапазона.

На рис. 3, *а* по индексному изображению на 2014 г. значения NDVI составляют от 0,08 до 0,16. В 2021 г. значения NDVI возросли, находятся в пределах 0,16–0,32. Наиболь-

Рисунок 2. Состояние нарушенной поверхности после проведения лесохозяйственной рекультивации: *а* – в 2014 г.; *б* – в 2021 г.; зоны посадки: *1* – ямы на горизонтальном участке; *2* – ямы на склоне карьера; *3* – борозды на склоне карьера
Figure 2. State of the disturbed surface after forestry reclamation: *a* – in 2014; *b* – in 2021; planting zones: *1* – holes on a horizontal section; *2* – pits on the slope of the quarry; *3* – furrows on the slope of the quarry

Таблица 1. Характеристика посадок по трем вариантам
Table 1. Characteristics of plantings according to three options

Зона	Вариант посадки	Площадь, м^2
1	Ямы на горизонтальном участке	2 643,73
2	Ямы на склоне карьера	8 256,20
3	Борозды на склоне карьера	13 883,10

шие значения индекса NDVI приурочены к варианту посадки кустов в борозды на склоне карьера, которые достигают 0,32.

Использование космических снимков и индексного изображения NDVI дает только общую картину состояния поверхности. Для детального изучения степени самозарастания нарушенной поверхности в августе 2019 и 2022 гг. проведены полевые исследования, во время которых осуществлялась оценка степени зарастания участков кустарниковой растительностью (рис. 4).

В результате полевых исследований установлена хорошая приживаемость как кустарниковой, так и травянистой растительности во всех трех вариантах посадки кустов.

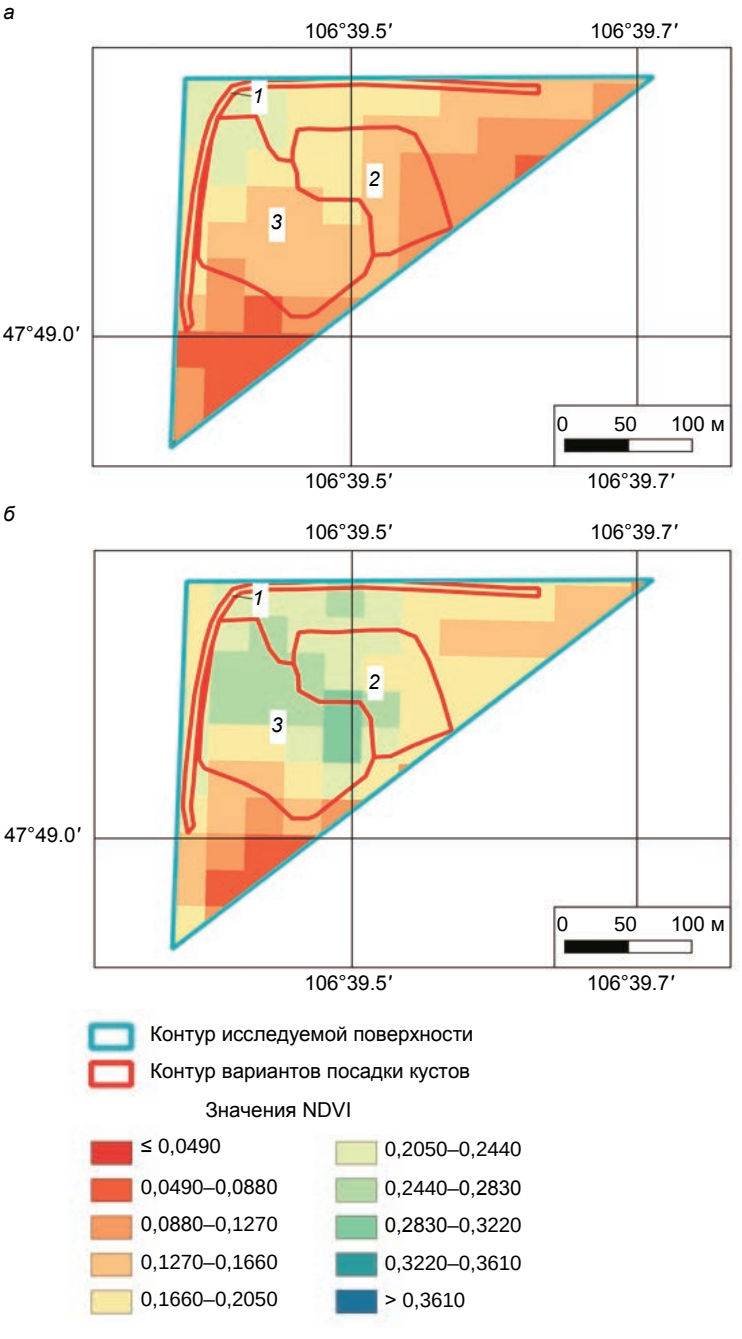


Рисунок 3. Состояние нарушенной поверхности после проведения лесохозяйственной рекультивации: *а* – в 2014 г.; *б* – в 2021 г.; зоны посадки: *1* – ямы на горизонтальном участке; *2* – ямы на склоне карьера; *3* – борозды на склоне карьера
Figure 3. State of the disturbed surface after forestry reclamation: *a* – in 2014; *b* – in 2021; planting zones: *1* – holes on a horizontal section; *2* – pits on the slope of the quarry; *3* – furrows on the slope of the quarry

Рисунок 4. Степень приживания кустарников в ямах – *а* и бороздах – *б*
Figure 4. Degree of survival of shrubs in pits — a and furrows – b

Заключение

Анализ космоснимков, индексного изображения NDVI и результатов полевых исследований рекультивированной поверхности после ликвидации карьера показал, что использование гребней (борозд) и создание ям на этапах лесохозяйственной рекультивации позволяет удерживать (сохранять) влагу в почвенном покрове, что дает положительные результаты при восстановлении растительности в условиях степной зоны Монголии.

Использование космических снимков для оценки вегетационного состояния рекультивированной поверхности с помощью индекса NDVI позволяет существенно упростить мониторинг восстановления растительного покрова и при необходимости оперативно проводить мероприятия по интенсификации процесса зарастания [2].

ЛИТЕРАТУРА

1. Батжаргал Д., Тальгамер Б. Л., Болотнев А. Ю., Олзоев Б. Н. Оценка влияния горных работ на растительность степной зоны по данным разновременной космической съемки // Проблемы недропользования. 2022. № 1(32). С. 77–84. https://doi.org./10.25635/2313-1586.2022.01.077
2. Батжаргал Д., Тальгамер Б. Л. Анализ интенсивности самозарастания нарушенных земель при добыче песчано-гравийной смеси в Монголии // Перспективы развития горно-металлургической отрасли (Игошинские чтения-2019): материалы XIX Междунар. науч.-практ. конф., 28–29 ноября 2019 г. Иркутск: ИРНИТУ, 2020. С. 33–39.
3. Wurihan, Bayarsaikhan S., Yuhai B., Siqin T., Hugejiletu J., Xueliang Y. Spatiotemporal variations of vegetation change and its response to climate change in Mongolia during 1982–2015 // Nature of Inner Asia. 2022. No. 2–3(21). P. 37–51. https://doi.org./10.18101/2542-0623-2022-2/3-37-51
4. Гантомор С., Алтанцэцэг М., Сарапулова Г. И. Влияние техногенеза на устойчивость геосистем в условиях урбанизации // Естественные и технические науки. 2010. № 3(47). С. 286–287.
5. Гомбосурэн Я., Зургаадай З., Сансардарьмаа Д. Горная экология: охрана недр и рекультивации земель в горных отводах золотодобычи Монголии // ГИАБ. 2008. № S1. С. 118–146.
6. Зеньков И. В., Баркова В. И., Нефедов Б. Н., Логинова Е. В., Ямских И. Е. Результаты полевых исследований и дистанционного мониторинга формирования экосистем на территории горнопромышленного ландшафта угольного разреза «Изыхский» // Экология и промышленность России. 2017. Т. 21. № 1. С. 36–41. https://doi.org./10.18412/1816-0395-2017-1-36-41
7. Рэгдэл Д., Дугаржав Ч., Гунин П. Д. Экологические требования к социально-экономическому развитию Монголии в условиях аридизации климата // Аридные экосистемы. 2012. Т. 18. № 1(50). С. 5–17.
8. Хоохорын Б. Оценки недропользования на горных предприятиях Монголии. М.: МГУ, 2003. 391 с.
9. Лебедев Ю. В., Лебедева Т. А., Коковин П. А., Арефьев С. А. Научные основы устойчивого землепользования в промышленных районах // Известия вузов. Горный журнал. 2017. № 4. С. 19–27.
10. Материалы космической съемки Landsat-7,8. URL: https://earthexplorer.usgs.gov
11. Cordell S., Questad E. J., Asner G. P., Kinney K. M., Thaxton J. M., Uowolo A., Brooks S., Chynoweth M. W. Remote sensing for restoration planning: how the big picture can inform stakeholders // Restoration Ecology. 2017. Vol. 25. Issue 52. P. 147–154. https://doi.org./10.1111/rec.12448
12. Karnieli A., Bayarjargal Y., Bayasgalan M., Mandakh B., Dugarjav Ch., Burgheimer J., Khudulmur S., Bazha S. N., Gunin P. D. Do vegetation indices provide a reliable indication of vegetation degradation? A case study in the Mongolian pastures // International Journal of Remote Sensing. 2013. Vol. 34. Issue 17. P. 6243–6262. https://doi.org./10.1080/01431161.2013.793865
13. Kremcheev E. A., Danilov A. S., Smirnov Yu. D. Metrological support of monitoring systems based on unmanned aerial vehicles // Journal of Mining Institute. 2019. Vol. 235. P. 96–105. https://doi.org./10.31897/PMI.2019.1.96
14. Pashkevich M. A., Danilov A. S., Matveeva V. A. Remote sensing of chemical anomalies in the atmosphere in influence zone of Korkino open pit coal mine // Eurasian mining. 2021. No. 1. P. 79–83. https://doi.org./10.17580/em.2021.01.16
15. Trevathan J., Johnstone R. Smart Environmental Monitoring and Assessment Technologies (SEMAT) – A New Paradigm for Low-Cost, Remote Aquatic Environmental Monitoring // Sensors (Basel). 2018. Vol. 18(7). Article number 2248. https://doi.org./10.3390/s18072248
16. Dedkov V. P., Danzhalova E. V., Tkachenko S. N., Khadbaatar S., Ariunbold E., Gunin P. D., Bazha S. N. The influence of vegetation on reflected solar radiation in arid and extra-arid zone of Mongolian Gobi // Geography, Environment, Sustainability. 2020. Vol. 13. No. 4. P. 72–80. https://doi.org./10.24057/2071-9388-2020-91

Статья поступила в редакцию 19 декабря 2023 года

UDC 622.01+65.011.56 http://doi.org/10.21440/2307-2091-2024-1-114-120

Analysis of the degree of overgrowth of lands disturbed during the extraction of building materials in the steppe zone of Mongolia

Dolgorsuren BATZHARGAL*
Boris Leonidovich TAL'GAMER**
Boris Nikolaevich OLZOEV***
Aleksandr Yur'evich BOLOTNEV****

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract

Introduction. In the steppe zones of Mongolia, the restoration functions of the natural landscape are poorly represented, which is determined by a number of factors – mountain climate, low precipitation, frequent winds and poor vegetation. When studying the impact of mining on the steppe landscape, it is necessary to assess the dynamics of vegetation restoration after reclamation measures.

The purpose of the study is to assess the degree of overgrowth of the reclaimed surface with shrub vegetation in the steppe zone of Mongolia.

Research methodology. To assess the area of the surface disturbed by mining operations, satellite images taken during the period from 2014 to 2021 were used. As a result of field observations and the use of images, it was established that at the stage of mining reclamation, the sides of the quarry were leveled and furrows were cut. At the biological stage of reclamation, shrub vegetation was planted in holes and furrows on the leveled surface. For a comprehensive study of the degree of overgrowth, multi-temporal index images of the vegetation state of the area were used. The NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) was used, which is determined by the brightness values of the image. To study in detail the degree of self-overgrowth of the disturbed surface in August 2019 and 2022 field research was carried out, during which the degree of overgrowing of areas with shrub vegetation was assessed.

Results and their analysis. It was found that as of 2014, NDVI values range from 0.08 to 0.16. In 2021, NDVI values have increased and are in the range of 0.16–0.32. The highest values of the NDVI index are associated with the option of planting bushes in furrows on the slope of the quarry; the index reaches 0.32.

Conclusions. As a result of field studies, it was established that the use of ridges (furrows) and the creation of holes at the stages of forestry reclamation makes it possible to retain (preserve) moisture in the soil cover, which gives positive results of vegetation restoration even in the conditions of the steppe zone of Mongolia.

***Keywords*:** steppe zone, disturbed lands, reclamation, satellite images, NDVI index.

REFERENCES

1. Batjargal D., Talgamer B. L., Bolotnev A. Yu., Olzoev B. N. 2022, Assessment of the impact of mining on the vegetation of the steppe zone according to multi-temporal satellite imagery data. *Problemy nedropol'zovaniya* [Problems of subsoil use], no. 1 (32), pp. 77–84. (*In Russ.*) https://doi.org./10.25635/2313-1586.2022.01.077
2. Batjargal D., Talgamer B. L. 2020, Analysis of the intensity of self-overgrowth of disturbed lands during the extraction of sand-gravel mixture in Mongolia. Prospects for the development of the mining and metallurgical industry. Irkutsk, pp. 33–39. (*In Russ.*)
3. Wurihan, Bayarsaikhan S., Yuhai B., Siqin T., Hugejiletu J., Xueliang Y. 2022, Spatiotemporal variations of vegetation change and its response to climate change in Mongolia during 1982–2015. *Nature of Inner Asia*, no. 2–3 (21), pp. 37–51. https://doi.org./10.18101/2542-0623-2022-2/3-37-51
4. Gantomor S., Altantsetseg M., Sarapulova G. I. 2010, The influence of technogenesis on the stability of geosystems under urbanization conditions. *Yestestvennyye i tekhnicheskiye nauki* [Natural and technical sciences], no. 3 (47), pp. 286–287. (*In Russ.*)
5. Gombosuren Y., Zurgaadai Z., Sansardarmaa D. 2008, Mining ecology: protection of subsoil and land reclamation in mountain allotments of gold mining in Mongolia. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mining information and analytical bulletin], no. S1, pp. 118–146. (*In Russ.*)
6. Zenkov I. V., Barkova V. I., Nefedov B. N., Loginova E. V., Yamskikh I. E. 2017, Results of field research and remote monitoring of the formation of ecosystems in the mining landscape of the Izykhsky coal mine. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and industry of Russia], vol. 21, no. 1, pp. 36–41. (*In Russ.*) https://doi.org./10.18412/1816-0395-2017-1-36-41
7. Ragdel D., Dugarzhav Ch., Gunin P. D. 2012, Environmental requirements for the socio-economic development of Mongolia in conditions of climate aridization. *Aridnyye ekosistemy* [Arid Ecosystems], vol. 18, no. 1 (50), pp. 5–17. (*In Russ.*)

✉doogii.do@mail.ru
**talgamer@ex.istu.edu
***bnolzoev@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0001-7105-6341
****abolotnev@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-4250-6216

8. Hoohoryn B. 2003, Assessments of subsoil use at mining enterprises in Mongolia. Moscow, 391 p. (*In Russ*.)
9. Lebedev Yu. V., Lebedeva T. A., Kokovin P. A., Arefiev S. A. 2017, Scientific foundations of sustainable land use in industrial areas. *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal* [News of Universities. Mining Journal], no. 4, pp. 19–27. (*In Russ*.)
10. Space photography materials Landsat-7,8. (*In Russ*.) URL: https://earthexplorer.usgs.gov
11. Cordell S., Questad E. J., Asner G. P., Kinney K. M., Thaxton J. M., Uowolo A., Brooks S., Chynoweth M. W. 2017, Remote sensing for restoration planning: how the big picture can inform stakeholders. *Restoration Ecology*, vol. 25, issue 52, pp. 147–154. https://doi.org./10.1111/rec.12448
12. Karnieli A., Bayarjargal Y., Bayasgalan M., Mandakh B., Dugarjav Ch., Burgheimer J., Khudulmur S., Bazha S. N., Gunin P. D. 2013, Do vegetation indices provide a reliable indication of vegetation degradation? A case study in the Mongolian pastures. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 34, issue 17, pp. 6243–6262. https://doi.org./10.1080/01431161.2013.793865
13. Kremcheev E. A., Danilov A. S., Smirnov Yu. D. 2019, Metrological support of monitoring systems based on unmanned aerial vehicles. *Journal of Mining Institute*, vol. 235, pp. 96–105. https://doi.org./10.31897/PMI.2019.1.96
14. Pashkevich M. A., Danilov A. S., Matveeva V. A. 2021, Remote sensing of chemical anomalies in the atmosphere in influence zone of Korkino open pit coal mine. *Eurasian mining*, no. 1, pp. 79–83. https://doi.org./10.17580/em.2021.01.16
15. Trevathan J., Johnstone R. 2018, Smart Environmental Monitoring and Assessment Technologies (SEMAT) – A New Paradigm for Low-Cost, Remote Aquatic Environmental Monitoring. *Sensors* (Basel), vol. 18 (7), article number 2248. https://doi.org./10.3390/s18072248
16. Dedkov V. P., Danzhalova E. V., Tkachenko S. N., Khadbaatar S., Ariunbold E., Gunin P. D., Bazha S. N. 2020, The influence of vegetation on reflected solar radiation in arid and extra-arid zone of Mongolian Gobi. *Geography, Environment, Sustainability*, vol. 13, no. 4, pp. 72–80. https://doi.org./10.24057/2071-9388-2020-91

The article was received on December 19, 2023

УДК 624.131.1, 624.131.7 http://doi.org/10.21440/2307-2091-2024-1-121-136

Анализ результата применения геотехногенного массива в сложных инженерно-геологических условиях города Екатеринбурга

Ольга Николаевна ОВЕЧКИНА*

ООО «Научно-изыскательский центр "СтройГеоСреда"», Екатеринбург, Россия

Аннотация

Актуальность. В связи с освоением новых территорий на окраинах города Екатеринбурга (микрорайонов Академический, Мичуринский, Солнечный и т. д.), а также застройкой в пределах заболоченных и подтопленных территорий, применяются новые технологии устройства фундаментов. Для предотвращения аварийных ситуаций и негативных последствий проявления инженерно-геологических процессов и явлений возведение и эксплуатацию любых зданий и сооружений необходимо вести в строгом соответствии с проектным решением. Поэтому наиболее актуальной проблемой при разработке проектных решений конструкций фундаментов зданий является обеспечение геотехнической и геомеханической безопасности. Выбор метода проектирования монолитной плиты на геотехногенном массиве требует особенно тщательных расчетов всех составляющих проекта. Несмотря на значительное количество уже существующих зданий, опыт изучения инженерно-геологических условий и их влияние на выбор технологии строительства, требуется особый подход при изучении каждой отдельной площадки строительства. Это связано как со сложными инженерно-геологическими условиями г. Екатеринбурга, сформировавшимися в результате длительной и сложной истории геологического развития Урала, так и с повышенной ответственностью проектируемых объектов капитального строительства.

Цель исследования – изучить компоненты природно-технической системы шестнадцатиэтажного аварийного дома, расположенного в г. Екатеринбурге, определить причины неравномерных деформаций грунтов в основании фундаментной плиты на геотехногенном массиве.

Методы исследования – изучение, анализ и обобщение инженерно-геологических, проектных и строительных материалов по аварийному дому; визуальное обследование конструкций здания; фотодокументация; геодезический мониторинг.

Результаты. Определены компоненты взаимодействия геологической среды и аварийного здания, выделены специфические грунты, определяющие неустойчивое состояние технической конструкции; рассмотрены этапы строительства, создания геотехногенного массива, укрепления грунтов и геодезические наблюдения за осадками; установлены причины неравномерных деформаций.

Выводы. Неравномерные осадки шестнадцатиэтажного дома связаны с изначально неудачным и рискованным проектом, который не соответствовал инженерно-геологическим условиям площадки строительства.

***Ключевые слова*:** природно-техническая система, специфические грунты, плитный фундамент, струйная цементация, геотехногенный массив.

Введение

Применение новых технологий проектирования и строительства в начале 2000-х гг. неизбежно столкнулось с проблемой неустойчивого взаимодействия фундаментов зданий и подстилающих грунтов. В сложных инженерно-геологических условиях Екатеринбурга, где региональным фактором являются элювиальные грунты, строители и проектировщики стремятся обеспечить высокую устойчивость и надежность возводимых зданий и сооружений. Большинство элювиальных, в том числе глинистых, грунтов Урала обладают высокой несущей способностью и могут служить надежным основанием сооружений. Но вместе с тем на новых осваиваемых территориях города применяют особые методы устройства фундаментов на слабых (сильносжимаемых) грунтах, что приводит к аварийным ситуациям и не обеспечивает безопасное функционирование этих зданий.

Под геотехногенным массивом понимается природно-техногенное образование, служащее нулевым циклом зданий и сооружений. Создается путем образования в природном массиве и на его поверхности комплекса искусственных элементов (например, инъекцией закрепляющих растворов), которые вместе с самим строением образуют единую пространственную структуру, обладающую необходимой несущей способностью [1].

При строительстве любых сооружений на грунтовом основании формируется некоторая система, которую принято называть природно-технической. *Природно-техническая система* (ПТС) есть целостная упорядоченная

✉oon5316@mail.ru
https://orcid.org/0009-0003-8087-5738

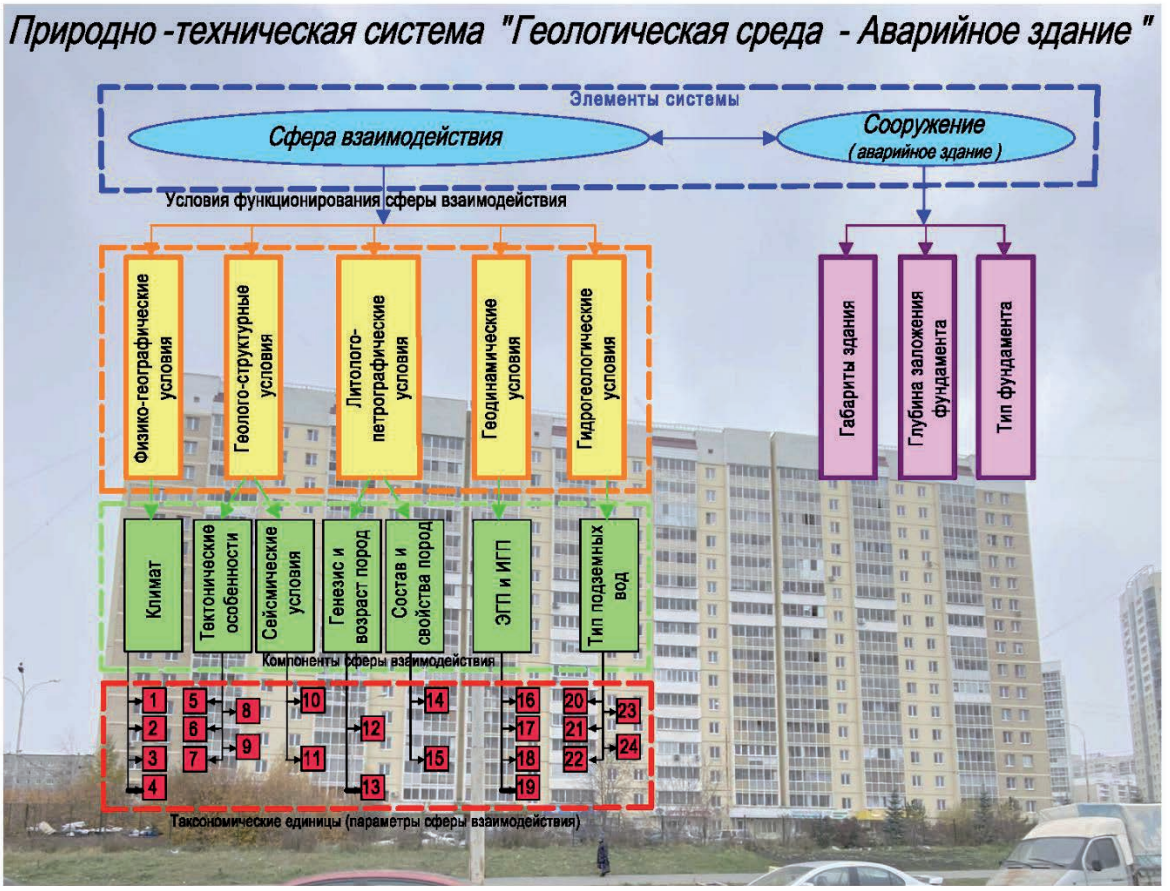


Рисунок 1. Схема природно-технической системы «Геологическая среда–Аварийное здание»; *климат*: *1* – количество атмосферных осадков; *2* – среднегодовая температура воздуха; *3* – сила и направление ветра; *4* – глубина промерзания грунтов; *тектонические особенности*: *5* – тип нарушений (пликативный, дизъюнктивный); *6* – возраст и характер тектонических нарушений; *7* – степень и характер трещиноватости; *8* – наличие зон дробления; *9* – наличие рассланцованности; *сейсмические условия*: *10* – сейсмические свойства горных пород; *11* – уровень подземных вод; *генезис и возраст горных пород*: *12* – генезис горных пород; *13* – возраст горных пород; *состав и свойства пород*: *14* – минеральный и гранулометрический состав горных пород; *15* – физико-механические свойства горных пород; *экзогенные геологические и инженерно-геологические процессы*: *16* – характер и тип геологических и инженерно-геологических процессов; *17* – условия развития геологических и инженерно-геологических процессов; *18* – размеры геологических и инженерно-геологических процессов; *19* – пораженность территории экзогенными геологическими процессами; *тип подземных вод*: *20* – условия залегания; *21* – гидравлические особенности водоносных горизонтов и комплексов; *22* – условия питания, разгрузки водоносных горизонтов и комплексов; *23* – химический состав подземных вод; *24* – режим подземных вод

Figure 1. Scheme of the natural-technical system "Geological environment–Emergency building"; climate: *1* – amount of atmospheric precipitation; *2* – average annual air temperature; *3* – wind strength and direction; *4* – depth of soil freezing; tectonic features: *5* – type of disturbance (plicative, disjunctive); *6* – age and nature of tectonic disturbances; *7* – degree and nature of fracturing; *8* – presence of crushing zones; *9* – presence of schistosity; seismic conditions: *10* – seismic properties of rocks; *11* – groundwater level; genesis and age of rocks: *12* – genesis of rocks; *13* – age of rocks; composition and properties of rocks: *14* – mineral and granulometric composition of rocks; *15* – physical and mechanical properties of rocks; exogenous geological and engineering-geological processes: *16* – nature and type of geological and engineering-geological processes; *17* – conditions for the development of geological and engineering-geological processes; *18* – dimensions of geological and engineering-geological processes; *19* – damage to the territory by exogenous geological processes; type of groundwater: *20* – conditions of occurrence; *21* – hydraulic features of aquifers and complexes; *22* – conditions of nutrition, discharge of aquifers and complexes; *23* – chemical composition of groundwater; *24* – groundwater regime

в пространственно-временном отношении совокупность взаимодействующих естественных и искусственных компонентов, представленных веществом и полями, которая обладает эмерджентными (системообразующими) свойствами [2]. Любую ПТС можно рассматривать на примере ПТС «Геологическая среда–Аварийное здание», а ее структуру можно представить в виде системы из нескольких иерархических уровней, главным элементом которой является сфера взаимодействия здания (рис. 1).

Сфера взаимодействия и все ее составляющие условий функционирования характеризуются набором компонент, которые определяют генетические особенности и тенденции процесса изменения геологической среды. Они взаимосвязаны, взаимообусловлены, имеют свое назначение, вклад (вес) при формировании и развитии тех или иных геологических процессов в пределах ПТС. Для того чтобы представленная модель была достаточной, необходима оценка параметров устойчивости грунтового массива и разработка системы мониторинга.

Нормальное функционирование ПТС должно быть обеспечено при условии работы любого здания в строгом соответствии с проектным режимом. Равновесие ПТС определяется динамичностью природной (сферой взаимодействия) и надежностью технических составляющих (проектом) [3].

Шкала величины расчетной силы сейсмического воздействия в баллах шкалы MSK-64 на инженерные объекты:

Степень ответственности объекта в плане сейсмобезопасности / Категория грунта в основании фундамента	I	II
Основное строительство	4	5
Повышенной ответственности	5	6
Особо ответственные	7	8

Рисунок 2. Выкопировка со схематической карты сейсморайонирования территории г. Екатеринбурга и его окрестностей: *1* – оси предполагаемых зон нарушения сплошности верхней части земной коры, выявленных в результате морфоструктурного анализа рельефа дневной поверхности; *2* – осевые зоны разломов, показанные на геологической карте г. Екатеринбурга и его окрестностей; масштаб 1 : 10 000; авторы: Р. Д. Калугина, В. Ф. Копанев, Г. А. Ильясова и др., ОАО «Уральская геолого-съемочная экспедиция», 1999; *3* – участок работ

Figure 2. Copy from a schematic map of seismic zoning of the territory of Ekaterinburg and its environs: *1* – axes of the supposed zones of discontinuity of the upper part of the earth's crust, identified as a result of morphostructural analysis of the relief of the day's surface; *2* – axial fault zones shown on the geological map of Ekaterinburg and its environs; scale 1: 10,000; authors: R. D. Kalugina, V. F. Kopanev, G. A. Ilyasova and others, OAO "Ural Geological Survey Expedition", 1999; *3* – work area

Рассмотрим особенности природно-технической системы аварийного 16-этажного жилого дома, расположенного в северной части г. Екатеринбурга.

В геоморфологическом отношении участок относится к левобережной части заболоченной долины реки Калиновки – правого притока р. Пышмы. Вся близлежащая территория ранее была покрыта торфом. Река Калиновка до 1980-х гг. текла открытым водотоком с урезом воды 252,31 м. При выполнении планировки земельного участка было изменено русло реки, расположенного в соответствии с генпланом возле третьего подъезда аварийного дома (1-я секция). В настоящее время река забрана в бетонный лоток, отметка которого вблизи площадки – 249,56 м.

Общий слабый северо-восточный уклон природной поверхности был нарушен при разработках торфа, беспорядочной отсыпке местного грунта и строительного мусора при работах по прокладке коллектора реки, строительстве зданий и сооружений. Абсолютные отметки рельефа находятся в пределах 261,15–259,95 м.

В геолого-тектоническом и неотектоническом отношении изучаемая территория расположена в северо-западном борту крупной (в масштабах Екатеринбурга) Камышинской денудационно-тектонической впадины. Ось впадины протягивается в северо-восточном направлении (по азимуту 55–60°) вдоль ул. Фрезеровщиков, приблизительно в 250 м от юго-восточной границы изучаемой площадки. Она может представлять собой реликтовую палеозойскую зону нарушения сплошности, предположительно имевшую характер зоны относительно субгоризонтального растяжения (рис. 2).

В районе изучаемого участка северо-западный борт впадины может пересекаться с рядом предполагаемых зон нарушения сплошности, которые образуют тектонические узлы.

В 150 м к востоку проходит осевая часть субмеридионального разлома, выявленного по результатам геологической съемки, выполненной подразделениями Уральского геологического управления. Этот разлом относится к системе Восточно-Свердловских разломов [4]. Элементом зоны геодинамического влияния упомянутой структуры является предполагаемая зона нарушения сплошности верхней части земной коры, которая ограничивает уча-

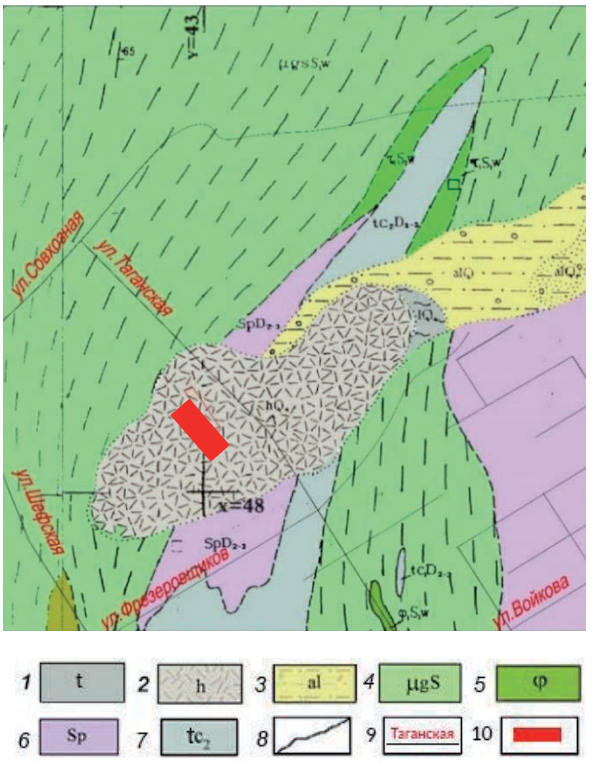


Рисунок 3. Выкопировка с геологической карты г. Свердловска, масштаб 1 : 10 000, под ред. Б. И. Кузнецова, 1964; *четвертичная система*: *1* – техногенные грунты; *2* – торфа; *3* – аллювиальные суглинки с галькой, пески; *нижний отдел силурийской системы, уинлокский ярус, кировградская свита*: *4* – зеленые сланцы (нерасчлененные), реже туфы порфиритов, переслаивающиеся с серицит-кварцевыми, кварц-серицитовыми и кварц-серицит-хлоритовыми сланцами; *5* – туфы пироксеновых порфиритов базальтового и андезито-базальтового состава; *средне-верхнедевонские интрузии* (D_{2-3}): *6* – серпентиниты перекристаллизованные нерасчлененные антигоритовые в различной степени карбонатизированные, реже оталькованные; *7* – тальк-карбонатные породы; *8* – контакты нормальные стратиграфические и интрузивные достоверные; *9* – ось улицы и ее название; *10* – изучаемый участок

Figure 3. Copy from the geological map of Sverdlovsk, scale 1: 10,000, ed. B. I. Kuznetsova, 1964; Quaternary system: *1* – technogenic soils; *2* – peat; *3* – alluvial loams with pebbles, sands; lower section of the Silurian system, Winlock stage, Kirovgrad formation: *4* – green shales (undivided), less often porphyrite tuffs, interbedded with sericite-quartz, quartz-sericite and quartz-sericite-chlorite schists; *5* – tuffs of pyroxene porphyrites of basaltic and andesite-basaltic composition; Middle-Upper Devonian intrusions (D_{2-3}): *6* – recrystallized undivided antigorite serpentinites, carbonated to varying degrees, less often talcized; *7* – talc-carbonate rocks; *8* – normal stratigraphic and reliable intrusive contacts; *9* – street axis and its name; *10* – study area

сток с запада и проходит в 50–75 м. Кроме того, в 50 м к юго-востоку от площадки может проходить в северо-восточном направлении (по азимуту 55–60°) ось предполагаемой флексурно-разрывной зоны.

Описанные структуры, представляющие собой реликтовые палеозойские зоны нарушения сплошности верхней части земной коры, были обновлены и отпрепарированы в мезо-кайнозойское время.

Приблизительно в 50–75 м к юго-востоку может располагаться тектонический узел, образованный взаимным пересечением разлома и флексурно-разрывной зоны северо-восточного направления.

В осевых частях и в зонах геодинамического влияния этих предполагаемых разрывных структур коренные палеозойские породы могут иметь повышенную степень раздробленности и обводненности. По разломам и трещинам в зонах их геодинамического влияния возможны микроподвижки, обусловленные действием на верхней части земной коры экзогенных, эндогенных и техногенных факторов. В качестве эндогенных факторов рассматриваются тектонические и гидрогеологические процессы. В качестве экзогенных факторов рассматриваются вариации атмосферных параметров, лунно-солнечные приливы, магнитные бури, возможные проявления сейсмоэлектрического эффекта при ударах молний в землю вблизи изучаемого объекта. Техногенными факторами могут являться взрывы в карьерах в окрестностях города, вибрации от движения транспорта и работы промышленных установок.

По зонам геодинамического влияния этих структур возможна эффективная передача сейсмической энергии в случае возникновения сейсмического явления на территории города и его окрестностей с некоторым увеличением силы сейсмического воздействия по сравнению с менее нарушенными и ненарушенными участками. Поэтому в таких зонах и, соответственно, в пределах площадки возможны повреждения линий подземных коммуникаций, ускоренный износ дорожного покрытия.

Согласно геологической карте г. Свердловска на топооснове масштаба 1 : 10 000 под ред. Б. И. Кузнецова, 1964 (рис. 3), исследуемая площадь приурочена к полосе метаморфических сланцев серицит-кварцевого, кварц-серицит-хлоритового состава, имеющих нижнесилурийский возраст (S_1). Сланцы залегают в виде пачек субмеридионального простирания с крутым западным падением. К востоку сланцы контактируют с рассланцованными серпентинитами и их производными (талькохлоритовыми, тальк-карбонатными породами), которые цепочкой протягиваются с северо-востока на юг.

Геологический разрез изучаемого участка (рис. 4) сложен следующими грунтами (сверху вниз):

1. *Насыпные грунты* представлены смесью суглинка (60 %), щебня (30 %), строительного мусора и торфа (10 %). Встречены мощностью 2,5–6,5 м, увеличиваясь на участках отвалов до 11 м. Большая часть грунта была образована с начала 1970-х гг. и относится к слежавшимся. В кровле грунты более рыхлые, неуплотненные;

2. *Органические отложения* представлены торфами сильноразложившимися, темно-бурого, черного цветов. Вскрыты мощностью 0,2–2,9 м;

3. *Суглинки аллювиальные мягкопластичные*, тяжелые песчанистые, зеленовато-серые, с прослоями песков мелких, с примесью органических веществ, с гравием и галькой до 10–15 %. Мощность грунта составляет 1,2–2,3 м;

4. *Суглинки аллювиальные полутвердые и тугопластичные*, тяжелые и легкие песчанистые, зеленовато-серые, с частыми прослоями песков мелких, с примесью органических веществ. Грунт залегает мощностью 0,5–6,9 м;

5. *Пески аллювиальные гравелистые*, серого цвета, неоднородные, плотные, с прослоями суглинков полутвердых и тугопластичных. Встречены мощностью 2,0–2,5 м;

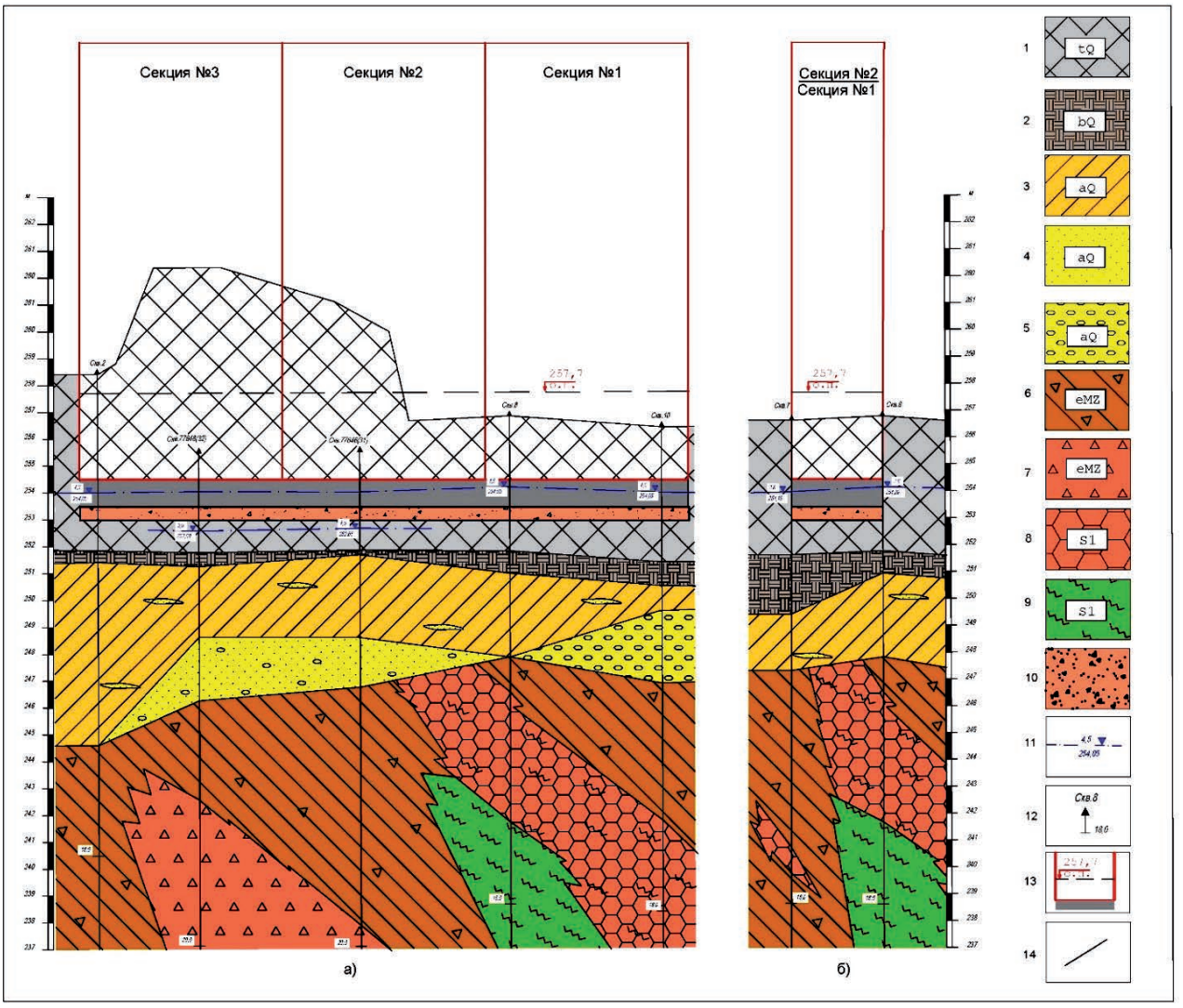


Рисунок 4. Инженерно-геологический разрез: *а* – продольный; *б* – поперечный; *1* – техногенные грунты четвертичного возраста; *2* – торф сильноразложившийся четвертичного возраста; *3* – суглинок аллювиальный четвертичного возраста, мягко- и тугопластичной консистенции; *4* – песок аллювиальный четвертичного возраста; *5* – гравийный грунт четвертичного возраста; *6* – суглинок элювиальный мезозойского возраста, твердый, с включением щебня; *7* – щебенистый грунт мезозойского возраста; *8* – сланцы низкой прочности силурийского возраста; *9* – сланцы малопрочные силурийского возраста; *10* – искусственное основание, представленное щебнем; *11* – абсолютная отметка уреза грунтовых вод (в числителе – глубина, м; в знаменателе – абс. отм., м); *12* – скважина, ее номер/глубина, м; *13* – контур дома и плитного фундамента с абс. отм. пола, м; *14* – литологические границы

Figure 4. Engineering geological section: *a* – longitudinal; *b* – transverse; *1* – technogenic soils of Quaternary age; *2* – highly decomposed peat of Quaternary age; *3* – alluvial loam of Quaternary age, soft and hard-plastic consistency; *4* – alluvial sand of Quaternary age; *5* – gravel soil of Quaternary age; *6* – eluvial loam of Mesozoic age, hard, with inclusions of crushed stone; *7* – crushed stone soil of Mesozoic age; *8* – low-strength shales of Silurian age; *9* – low-strength shales of Silurian age; *10* – artificial foundation, represented by crushed stone; *11* – absolute elevation of the groundwater line (in the numerator – depth, m; in the denominator – absolute elevation, m); *12* – well, its number/depth, m; *13* – outline of the building and slab foundation with absolute floor elevation, m; *14* – lithological boundaries

6. *Гравийные грунты*, неоднородные, с прослоями суглинков, серые. Встречены отдельными скважинами на глубине 7,1 м, мощность составляет 2,5–2,7 м;

7. *Суглинки элювиальные* желтовато-серого и зеленовато-серого цвета, от твердой до тугопластичной консистенции, с сохранившейся структурой коренных пород, участками дресвяные, с линзами рухляка и щебня. Мощность изменяется от 1,2 до 8,5 м;

8. *Обломочные элювиальные грунты*, представленные щебнем, с сильновыветрелыми обломками, с твердым суглинистым заполнителем до 25 %, встречены отдельными скважинами мощностью до 7,0 м;

9. *Скальные грунты*, представлены кварц-серицит-хлоритовыми сланцами различной степени выветрелости, прочности и трещиноватости. Кровля скальных грунтов залегает на глубине от 10,2 до 14,6 м.

Физико-механические свойства грунтов приведены в табл. 1.

На данной территории развиты **специфические грунты** – техногенные, биогенные и элювиальные.

Техногенные грунты представлены в разрезе отходами производств и беспорядочной свалки, вскрытой мощностью 2,5–6,5 м. Нижняя часть слоя относится к слежавшимся, но неоднородным грунтам (степень неодно-

Таблица 1. Физико-механические характеристики грунтов
Table 1. Physical and mechanical characteristics of soils

Номер ИГЭ	Наименование грунта	Природная влажность, доли ед.	Показатель текучести, доли ед.	Коэффициент пористости, доли ед.	Плотность грунта ρ, г/см³	Удельное сцепление *C*, МПа	Угол внутреннего трения φ, град	Модуль деформации *E*, МПа	Предел прочности на одноосное сжатие в водонасыщенном состоянии, МПа
1	Насыпной грунт	Не нормируется							
2	Торф сильноразложившийся	2,492		5,256	1,10	0,020	12	3	–
3	Суглинок аллювиальный мягкопластичный	0,287	0,60	0,789	1,95	0,013	14	5	–
4	Суглинок аллювиальный тугопластичный	0,230	0,07	0,596	2,06	0,031	18	14	–
5	Песок аллювиальный гравелистый			0,500	1,80	0,001	32	25	–
6	Гравийный грунт аллювиальный				2,10	R_0 = 0,5 МПа		30	–
7	Суглинок элювиальный	0,282	< 0–0,11	0,762	2,01	0,022	29	18	–
8	Щебенистый грунт				2,20	R_0 = 0,4 МПа		28	–
9	Сланцы низкой прочности				2,30			–	2,7
10	Сланцы малопрочные				2,56			–	13,0

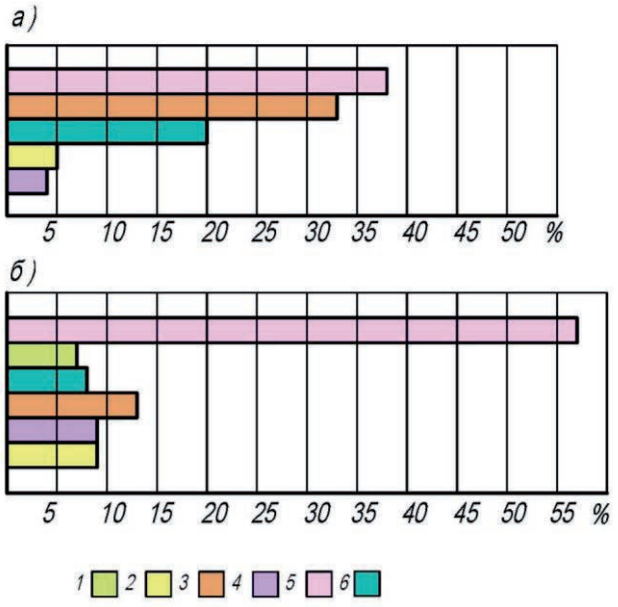


Рисунок 5. Минеральный состав коры выветривания, %: *а* – дисперсный горизонт (глубина 10 м); *б* – рухляковый горизонт (глубина 12,5 м); *1* – монтмориллонит; *2* – вермикулит; *3* – каолинит; *4* – гётит; *5* – кварц; *6* – гидромусковит
Figure 5. Mineral composition of the weathering crust, %: *a* – dispersed horizon (depth 10 m); *b* – crumbling horizon (depth 12.5 m); *1* – montmorillonite; *2* – vermiculite; *3* – kaolinite; *4* – goethite; *5* – quartz; *6* – hydromuscovite

родности (C_u) изменяется от 41,3 до 111,1). Верхняя часть слоя (мощностью до 1,5 м) более рыхлая, неуплотненная, состоит из суглинка (60 %), торфа (20 %), строительного мусора (щебень гранита, обломки бетона, дерево). Природная влажность изменяется от 0,153 до 0,343 доли ед., относительное содержание органических веществ составляет 0,03–0,05.

Биогенные грунты, представленные торфом мощностью 0,2–2,9 м, оцениваются как сильноразложившиеся (D_{dp} = 52,7–65,2 %), по показателю природной влажности (W = 1,11–4,47 доли ед.) от осушенного до маловлажного, обладают высокой пористостью (n = 73,4–87,9 %), малой прочностью и большой сжимаемостью. В соответствии с «Пособием по проектированию оснований зданий и сооружений к СНиП 2.02.01-83» модуль осадки торфа при нагрузке 0,1 МПа составляет 200 мм/м; коэффициент консолидации – 1,0 м²/год.

Техногенные и биогенные грунты характеризуются неоднородным составом и незакономерным изменением показателей физических и механических свойств и, как следствие, неоднородными сжимаемостью и прочностью. Вследствие этого не рекомендуется их применение в качестве основания сооружений (табл. 1).

Элювиальные грунты обладают высокой изменчивостью физико-механических свойств как в плане, так и по глубине. Плотность изменяется от 1,87 до 2,06 г/см³, по числу пластичности – это суглинки и глины (0,072–0,29 доли ед.), твердой и полутвердой консистенции; пористость 39–46 %; удельное сцепление – 0,010–0,040 МПа, угол внутреннего трения 24–33 град, компрессионный модуль деформации 3,7–6,9 МПа. Такие свойства связаны с неравномерным выветриванием и минеральным составам коры выветривания. По классификации Л. А. Ярг профиль коры выветривания изучаемого участка представлен в следующем виде: *1. Обломочная зона (II)*, состоящая из глыбовой и щебнистой подзон. *Глыбовая подзона (IIа)* сложена сланца-

ми различной степени выветрелости и трещиноватости, вскрытой мощностью 3,2–4,6 м; *щебнистая подзона (IIб)* представлена щебенистыми грунтами с твердым суглинистым заполнителем, мощностью 2,5–7,0 м. *2. Дисперсная зона (IV)* представлена суглинками от твердой до тугопластичной консистенции, мощностью 1,2–8,5 м. Общая вскрытая мощность коры выветривания составляет от 4,0 м до 11,0 м. Кровля скальных грунтов имеет неровный характер и залегает на глубине 10,2–14,6 м.

В минеральном составе дисперсного и рухлякового горизонта обращает на себя внимание большое количество кварца, резкое снижение полевого шпата и, соответственно, увеличение количества гидрослюды снизу вверх по разрезу, что выражается в количественном увеличении гидромусковита от 8 % (рухляковый горизонт) до 20 % (дисперсный горизонт), а также в появлении монтмориллонита в рухляковом горизонте (7 %) и каолинита в обоих горизонтах (13–33 %). Породообразующими минералами горизонтов являются гётит – 4–9 %; смешаннослойные (вермикулит) – 5 %; кварц – 38–57 %.

Гидрогеологические условия определяются развитием двух водоносных горизонтов: трещинно-грунтового водоносного горизонта, приуроченного к верхней зоне метаморфизованных пород, и горизонта поровых вод четвертичных отложений. Оба горизонта имеют единую поверхность. Уровень подземных вод встречается на глубине 0,2–4,5 м (абс. отм. 254,05–256,50 м). По химическому составу воды смешанного состава, высокие значения минерализации (980–2234 мг/дм^3) и сульфатов (480–1280 мг/дм^3) свидетельствуют о техногенном загрязнении, обладают агрессивными свойствами, что оказывает большое влияние на процесс коррозии металлов. Коэффициенты фильтрации грунтов основания следующие: насыпные грунты – 5,0 м/сут, суглинки аллювиальные – 0,08 м/сут; песок аллювиальный и гравийный грунт – 0,3–2,2 м/сут; суглинок элювиальный – <0,01 м/сут; щебенистый грунт – 1,0–2,0 м/сут; скальные грунты различной степени трещиноватости – 1,0–1,5 м/сут.

С учетом результатов Общего сейсмического районирования территории РФ ОСР–2015 изучаемый участок располагается в пределах области развития грунтов второй и частично третьей категорий по сейсмическим свойствам по классификации СП 14.13330.2018 «Строительство в сейсмических районах». Актуализированная редакция СНиП II–7–81*. Величина расчетной силы сейсмического воздействия оценивается в 6 баллов по шкале MSK-64.

На изучаемой территории развиты **геологические и инженерно-геологические процессы.** Наиболее значимыми из них являются: выветривание, тектоническая нарушенность, подтопление. Выветривание и тектоническую нарушенность мы связываем с длительной и сложной историей геологического развития Урала. А вот на подтопление территории оказывают влияние приуроченность участка к погребенной долине реки, слабая фильтрационная способность толщи аллювиальных суглинистых отложений, нарушение естественного стока, возможные утечки из водонесущих коммуникаций. В связи с изменением гидродинамического режима, связанного с разработкой глубоких котлованов близлежащей застройки территории и техногенного воздействия на горные породы, могут развиваться процессы суффозии, обрушения.

Рассмотрим техническую составляющую природно-технической системы аварийного дома, построенного в период 2006–2008 гг.

Шестнадцатиэтажный трехсекционный жилой дом выполнен из крупнопанельных конструкций с несущими продольными и поперечными стенами, есть техподполье, техэтаж и чердак, каркас облицован огнеупорным кирпичом. В здании размещено 360 квартир, 9 офисных помещений. Согласно проектным решениям, фундаментом должен был служить монолитный железобетонный ростверк по железобетонным сваям с расположенными по нему блоками ФБС, по блокам выполнен монолитный железобетонный армопояс.

Но в процессе производства строительных работ было принято решение по изменению конструктива фундамента здания на монолитную плиту для каждой секции с геотехническим массивом в основании, созданного с помощью струйной цементации в 30 скважинах. Толщина

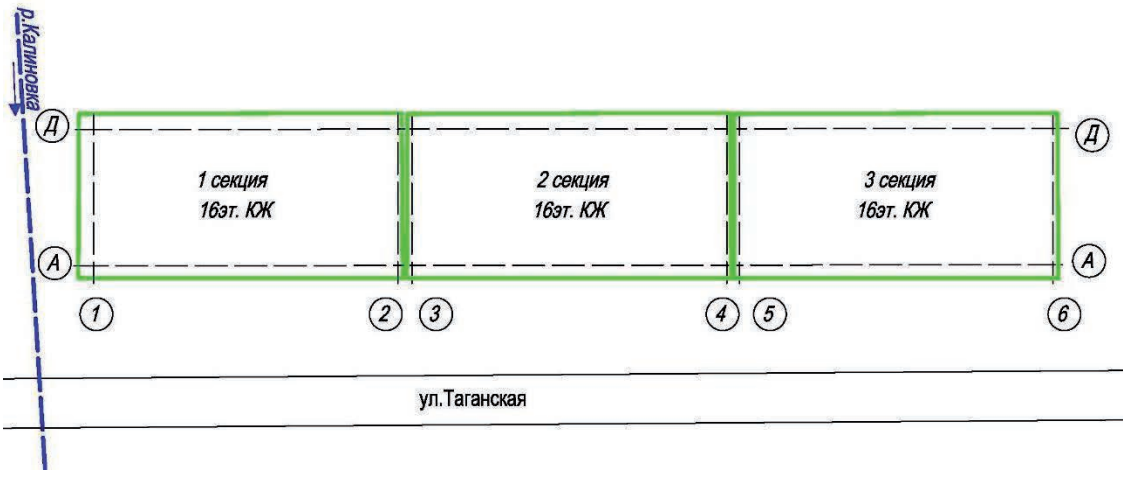


Рисунок 6. Схема расположения секций шестнадцатиэтажного жилого дома. Цифрами и буквами обозначены основные строительные оси
Figure 6. Layout of sections of a sixteen-story residential building. Numbers and letters indicate the main construction axes

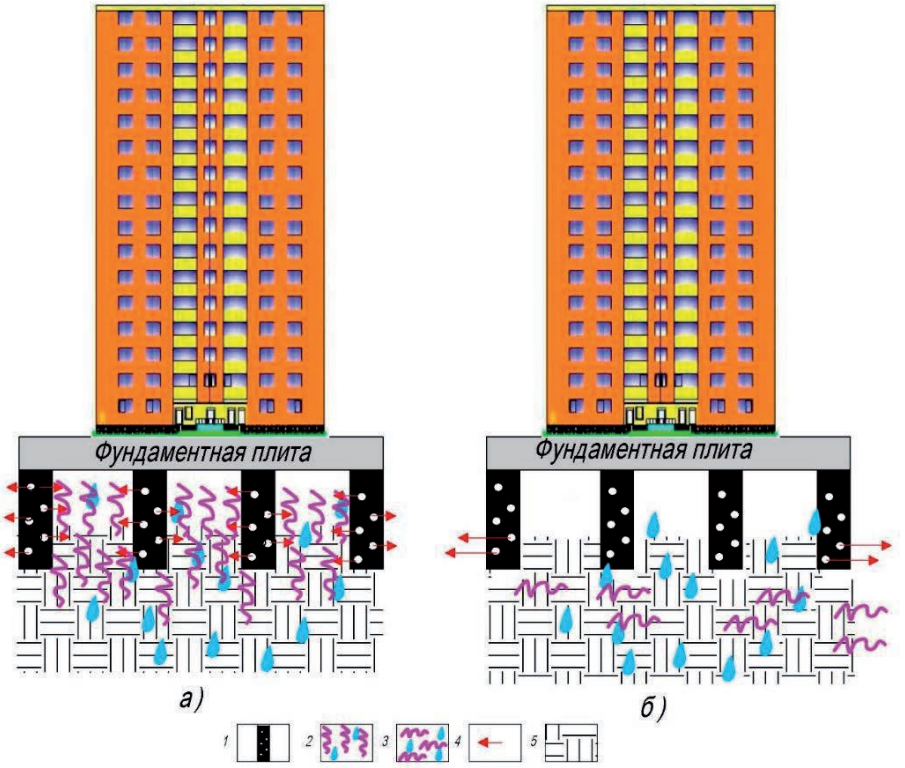


Рисунок 7. Мероприятия по созданию геотехногенного массива (по материалам заключения специалистов ООО НИЦ «ГЕОТЕХСТРУКТУРА», 2001, В. В. Лушникова, Ю. Р. Оржеховского с дополнениями автора): *а* – запланировано (геотехногенный массив создан); *б* – факт (цементно-песчаная смесь растекается в неконтролируемых направлениях, геотехногенный массив не создан); *1* – труба с отверстиями; *2*, *3* – цементно-песчаный раствор для создания геотехногенного массива; *4* – направление движения цементно-песчаного раствора; *5* – торф

Figure 7. Activities to create a geotechnogenic massif (based on the conclusion of specialists from OOO Scientific Research Center "GEO-TECHSTRUCTURE", 2001, V. V. Lushnikov, Yu. R. Orzhekhovsky with additions by the author): *a* – planned (geotechnogenic massif has been created); *b* – fact (the cement-sand mixture spreads in uncontrolled directions, the geotechnogenic massif has not been created); *1* – pipe with holes; *2, 3* – cement-sand mortar for creating a geotechnogenic massif; *4* – direction of movement of the cement-sand mortar; *5* – peat

фундаментной плиты для секций № 1 и 2 составила 800 мм, для секции № 3 – 900 мм (рис. 6).

Метод струйной цементации грунтов был запатентован в 1971 г. в Японии. Первые экспериментальные работы по применению струйной технологии выполнялись японской компанией «Каджима корпорейшен», менее чем за 10 лет данная технология стала популярна и признана эффективной во многих странах мира.

Концепция геомассива активно изучалась и обсуждалась в трудах ряда известных специалистов в области фундаментостроения в конце 1990-х–начале 2000-х гг. Технология струйной цементации много лет исследовалась, опробовалась и адаптировалась на грунтах г. Санкт-Петербурга [5–9], а также применялась на объектах в городах Ивдель, Невьянск Свердловской области, г. Волгодонске [1].

Представленный метод основывается, прежде всего, на инъекционном уплотнении грунтов основания путем нагнетания по специальной технологии цементного раствора при давлении, значительно превышающем нагрузки на грунт от здания. В результате такого нагнетания обычно происходит повышение плотности и улучшение механических свойств слабых грунтов. Это происходит как за счет уплотнения, так и за счет образования жестких включений из застывшего уплотняющего раствора, что превращает массив грунта в природно-техногенный композит с высокими прочностными и деформационными свойствами.

Конструктивные решения геотехнических массивов полностью зависят от технологии их выполнения. На сегодняшний день можно выделить два основных способа устройства геотехнических массивов: высоконапорная инъекционная технология и струйная цементация (технология "jet grouting") [10].

Технологический процесс однокомпонентной струйной цементации включает: лидерное бурение скважин, разрушение грунта острой струей цементного раствора (при необходимости – с химическими добавками) под высоким давлением (30–40 МПа), вытеснение пульпы на поверхность [11].

Этот метод позволяет уплотнять не только дисперсные связанные грунты (глины, суглинки, супеси), но и несвязанные дисперсные грунты (пески, насыпные техногенные грунты). Расширение возможностей применения технологии на широком спектре грунтов, по словам авторов, происходит за счет подбора качественной характеристики раствора, обеспечивающего его высокую проникающую способность. В описании метода указывается, что

наличие грунтовых вод не является противопоказанием к применению методики закрепления основания.

В соответствии с нормативными документами СП 291.1325800.2017 «Конструкции грунтоцементные армированные. Правила проектирования» (утверждены приказом Минстроя России № 785/пр. от 15 мая 2017 г. с Изменением № 1) применение данного метода нецелесообразно на торфяные грунты. В данных грунтах, обладающих низкой сопротивляемостью и очень высокой пористостью, происходит бесконтрольное растекание цементно-песчаного раствора. В случае, когда торф представлен в разрезе ограниченным слоем и соседствует в кровле и подошве с другими разновидностями грунтов, также нуждающимися в усилении, достигнуть значимого положительного эффекта от инъекционного упрочнения практически невозможно. Слабый слой торфа является мощным каналом утечки раствора, куда и пойдет – по пути наименьшего сопротивления – основная масса смеси (рис. 7).

Контроль плотности грунта при создании геотехмассива выполнен проектной организацией в 2006 г. геофизическим корреляционным методом преломленных волн, отдельными сейсмозондированиями, по системе встречных и нагоняющих годографов продольных волн с регистрацией гармоник поверхностных волн Рэлея.

Характерной особенностью записей на сейсмограммах, полученных после формирования геотехногенной плиты, является изменение наклона осей синфазности в сторону увеличения скоростей распространения упругих волн и увеличение частоты регистрационных колебаний на спектрограммах. Преобладающая частота на записях после создания геотехмассива составляла 25–30 Гц, до создания – 15–20 Гц. Устойчивая форма импульсов коррелируемых волн по амплитуде и частоте свидетельствует об однородном характере геотехнической плиты.

Анализ значений скоростей V_p и поперечных волн V_s, измеренных до и после создания геотехмассива, свидетельствует об увеличении скоростей распространения V_p в среднем на 25 %, V_s – на 40 %. Главной причиной увеличения значений V_p является увеличение плотности грунта под давлением внедряющегося раствора. Увеличение значений V_s связано с повышением деформационных и прочностных свойств грунтов E, C, φ за счет жесткости контактов между частицами грунта вследствие уплотнения грунтового массива и цементации пространства вокруг инъектора в радиусе от 15 до 30 см на глубину до 4,0 м. Значения модуля деформации увеличились в среднем на 100 % – от 6–10 МПа до 13–22 МПа. Выполненные геодезические наблюдения за деформациями грунтов основания, особенно в период строительства и устройства геотехмассива, были прекращены в мае 2007 г. В октябре 2007 г. наблюдения снова возобновили в связи с появившимися деформациями в крыльцах здания, однако в этот период основные осадки уже реализовались.

В феврале–марте 2008 г. при освидетельствовании несущих конструкций жилого дома были обнаружены трещины стен, приуроченные в основном к участкам примыкания плит под крыльцами по оси Д к плите дома, и трещины в стенах по оси В и Г в районе лестничных клеток. Образовавшиеся деформации привели к перекосу дверных проемов (входы в квартиры).

Начиная с августа 2008 г. в здании начали фиксироваться деформации (осадки) с наибольшими значениями в осях В–Г/9–10 (1-я секция) и в осях В–Д/1–2 (2-я секция). Проектной организацией, выполняющей наблюдения за осадками, было установлено: «… Трещины, образовавшиеся в конструкциях, продолжают раскрываться». Приращение осадки составило 1–3 мм в месяц. По характеру осадок можно сделать вывод, что вторая секция «тянет за собой» первую секцию.

Дополнительные осадки были выполнены перегрузом фундаментной плиты грунтом слоем около 1 м, что составило 6–8 % от расчетной нагрузки. В проекте эта нагрузка не была предусмотрена. И в апреле 2009 г. было принято решение о необходимости срочного выполнения усиления грунтов основания.

В соответствии с техническими решениями на I этапе планировалось бурение скважин № 1–58 (2-я секция), № 59–107 (1-я секция) – итого 107 скважин. На II этапе планировалось бурение 113 скважин. Нагнетание раство-

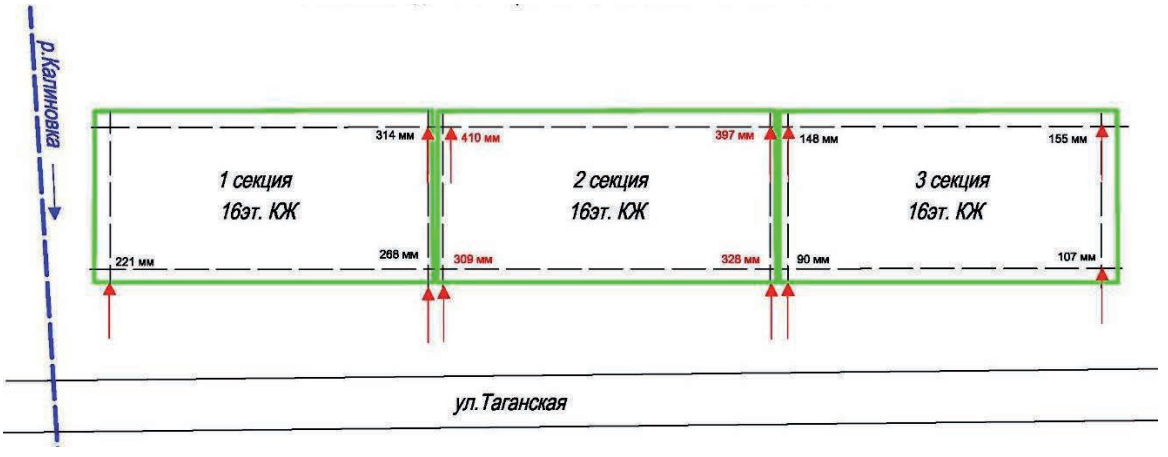


Рисунок 8. Отклонение здания от вертикальной плоскости на 25 января 2021 г. Стрелками показано направление отклонения от вертикали, цифрами – значения отклонений в миллиметрах

Figure 8. Deviation of the building from the vertical plane as of January 25, 2021. Arrows show the direction of deviation from the vertical, numbers show the deviation values in millimeters

Таблица 2. Максимальные отклонения секций дома от вертикальной плоскости, мм
Table 2. Maximum deviations of the building sections from the vertical plane, mm

Секция	Дата замеров			
	25.04.2018	06.12.2018	24.04.2019	25.01.2021
1	282	296	295	314
2	377	389	389	410
3	136	147	146	148

Рисунок 9. Дефекты и повреждения на 16-м этаже 1-й секции: *а* – трещины между плитами перекрытия на потолочной поверхности; *б* – трещины над дверными проемами, повторное раскрытие трещин на этажах после ремонта
Figure 9. Defects and damage on the 16th floor of the 1st section: *a* – cracks between the floor slabs on the ceiling surface; *b* – cracks above doorways, repeated opening of cracks on floors after repairs

ра марки 200 с В/Ц 0,55–0,60 с добавкой пластификатора в инъекторы выполнять до отказа при давлении 12 атм.

В феврале 2010 г. был закончен I этап выполнения бурения и инъекцирования цементно-песчаной смеси первых 32 скважин (2-я секции) и 29 скважин (1-я секция) глубиной 5,5 м. После чего была выполнена серия наблюдений за осадками. По мнению проектной компании, выполняющей укрепление грунтов, было решено, что осадки грунтов основания выровнялись. Работы по второму этапа усиления грунтов основания не проводились.

За время эксплуатации дома в первые два года (2008–2009) появились трещины в местах общего пользования, на входных группах, отслоение декоративной плитки на цокольной части и крыльцах. В квартирах появились трещины и деформации проемов. В некоторых квартирах перестали открываться и закрываться входные двери, оконные блоки, появились искривления профиля остекления лоджий.

В соответствии с анализом деформаций секции № 2 за период с 28.09.2006 по 10.10.2011 г. максимальная осадка с 2006 г. до усиления грунтов 2010 г. по графику составила более 20 см, до октября 2011 г. более 25 см от первоначальной. Причем по расчетам проектной компании было установлено, что до выполнения усиления максимальная скорость осадки примерно составляла 4 мм в год, после усиления должна была составить 2 мм в год.

Во время геодезических наблюдений, проведенных компанией, выполняющей обследование конструкций в период с 2018 по 2021 г., отмечены максимальные отклонения плоскости парапета относительно второго этажа (табл. 2).

В целом отмечается прогиб здания. Наблюдается просадка грунтов со стороны двора и выпор со стороны улицы. Значения осадок увеличиваются от торцов здания к середине (рис. 8). Максимальную осадку имеет 2-я секция, минимальную – 3-я секция. Изменение осадок второй сек-

а *б*

Рисунок 10. Дефекты и повреждения по периметру здания со стороны двора: *а* – трещины в асфальте, сквозные трещины над дверными проемами, просадка грунта у входных групп и крылец; *б* – просадка грунта под отмосткой, сквозные вертикальные трещины в кирпичной кладке стен крыльца, сквозные поперечные трещины в пандусе

Figure 10. Defects and damage along the perimeter of the building from the courtyard side: *a* – cracks in the asphalt, through cracks above doorways, soil subsidence at the entrance lobbies and porches; *b* – subsidence of soil under the pavement, through vertical cracks in the brickwork of the porch walls, through transverse cracks in the ramp

а *б*

Рисунок 11. Дефекты и повреждения по периметру здания со стороны двора: *а* – раскрытие шва между подъездами, отслоение облицовочной плитки; *б* – просадка грунта

Figure 11. Defects and damage along the perimeter of the building from the courtyard side: *a* – opening of the seam between the entrances, peeling of the facing tiles; *b* – soil subsidence

а *б*

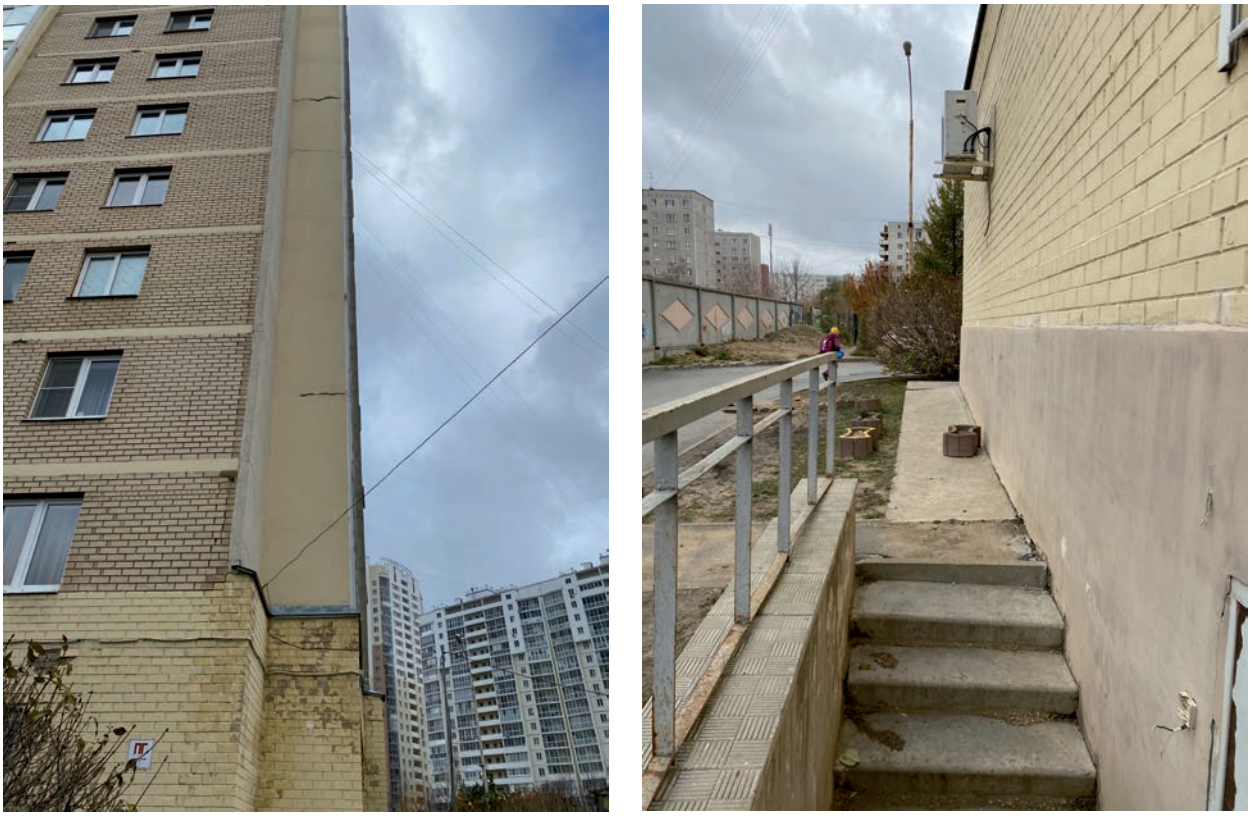


Рисунок 12. Дефекты и повреждения по периметру здания: *а* – горизонтальные трещины в кладке стен секции 3; *б* – просадка грунта с торца секции 1

Figure 12. Defects and damage along the perimeter of the building: *a* – horizontal cracks in the masonry of the walls of section 3; *b* – soil subsidence from the end of section 1

а *б*

Рисунок 13. Отклонение секций 2 и 3 относительно друг друга: *а* – на крыше; *б* – со стороны улицы

Figure 13. Deviation of sections 2 and 3 relative to each other: *a* – on the roof; *b* – from the street side

ции за 2 года 9 месяцев увеличилось более чем на 30 мм. Вне зависимости от наличия деформационных швов между секциями наблюдается движение секций 1 и 3 вслед за секцией 2, что ведет не только к проседанию, но и развороту секций 1 и 3. По результатам замеров изменения координат марок в плоскости здания установлено наличие смещений секций в уровне технического этажа величиной от 5 до 31 мм. Величины смещения углов здания (в плоскости) каждой отдельной секции свидетельствуют о переходе коробки из прямоугольного параллелепипеда в наклонный.

В соответствии с табл. 6. 1. СП 70.13330.2012. «Несущие ограждающие конструкции» отклонение от вертикали панелей несущих стен на всю высоту здания не должно быть более 50 мм.

В результате визуального обследования конструкций были обнаружены следующие дефекты и повреждения: сквозные вертикальные и горизонтальные трещины в стенах, трещины между плитами перекрытия на потолочной поверхности, наклонные трещины в стеновых панелях, трещины в полу произвольного очертания, сквозные вертикальные трещины в кирпичной кладке стен, сквозные поперечные трещины в армопоясе по стеновым панелям подвала, сквозные трещины над дверными и оконными проемами, повторное раскрытие трещин на этажах после ремонта и замены дверных коробок и полотен входа в квартиры после их повреждения, сквозные горизонтальные трещины в кладке стен, сдвиг стеновых панелей, просадка грунта по периметру здания, просадка покрытия пандуса, отслоение отделочной плитки, отклонение парапетных плит от горизонтальной плоскости над температурным швом, раскрытие шва между подъездами, отклонение по высоте подъездов относительно друг друга, трещины в узлах примыкания стеновых панелей возле шва между подъездами, трещины в материале заполнения шва между подъездами и многое другое (рис. 9–14).

Рисунок 14. Отклонение парапетных плит от горизонтальной плоскости над температурным швом между секциями 2 и 3
Figure 14. Deviation of parapet slabs from the horizontal plane above the expansion joint between sections 2 and 3

Выводы

В соответствии с требованием механической безопасности (ст. 7, п. 3 Федерального закона Российской Федерации от 30.12.2009 № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений») необходимо выполнять строительство так, чтобы нормой было «…отсутствие деформаций недопустимой величины строительных конструкций, основания здания или сооружения и геологических массивов прилегающих территорий». Для этого целесообразно смоделировать сценарии возникновения опасных природных и техногенных геологических процессов, учитывающих особенности взаимодействия элементов строительных конструкций между собой и с основанием, и предусмотреть работы по улучшению свойств грунтов основания.

Бесконечное разнообразие способов приспособления к объективным обстоятельствам в **Природе** заставляет **Человека** искать разумные решения, касающиеся способов устройства оснований и фундаментов в разнообразных природных условиях [1, 12].

Усложнение формы, увеличение этажности зданий и сооружений, повышенной плотности городской застройки ставит перед геотехниками задачу совершенствования методов расчета грунтовых оснований на базе более совершенных (нелинейных) моделей [13–15].

Выбор методов проектирования и устройства искусственно улучшенных оснований в большинстве случаев осуществляется экспериментальным путем на площадке строительства и не всегда полученное решение бывает оптимальным [16, 17].

Основными причинами неравномерных деформаций грунтов в основании фундаментной плиты на геотехногенном массиве и, как следствие, нормального функционирования ПТС аварийного шестнадцатиэтажного здания являются:

1. Сложные инженерно-геологические условия площадки строительства: наличие большой толщи техногенных и биогенных грунтов, обладающих неоднородным составом и незакономерным изменением показателей физических и механических свойств, и, как следствие, неоднородными сжимаемостью и прочностью; подтопление территории; расположение участка в осевых частях и в зонах геодинамического влияния предполагаемых разрывных структур (коренные палеозойские породы имеют повышенную степень раздробленности и обводненность);

2. Неудачный и рискованный проект, который не соответствовал грунтовым условиям площадки строительства, так как торф не был в должной степени уплотнен и

упрочнен. Отсутствие эффективного упрочнения торфа и привело к долгосрочным осадкам, а случайность распределения техногенной бетонной компоненты в массиве сделала их неравномерными;

3. Отсутствие геодезических наблюдений в период строительства (устройства фундаментной плиты на геотехногенном массиве), что не позволило вовремя выполнить дополнительное нагнетание цементно-песчаного раствора в грунтовую толщу для предотвращения неравномерных осадок основания, повлекших за собой деформации конструкций.

Решение проектной компании о применении плитного фундамента на геотехническом массиве для устройства шестнадцатиэтажного дома не соответствует геологическим условиям площадки и является неадекватным по отношению к типовой коробке здания, не обладающей способностью воспринимать неравномерные осадки. Целесообразнее было бы применение свайного фундамента, который изначально был рассчитан проектом на элювиальные грунты, обладающие более высокой несущей способностью по сравнению с торфом и служащие надежным основанием большинства зданий и сооружений в г. Екатеринбурге.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лушников В. В. Слово о фундаменте, или Фундамент здания как аналог опор творений Природы // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. 2019. Т. 10. № 2. С. 14–25. https://doi.org/10.15593/2224-9826/2019.2.02
2. Бондарик Г. К. Научные основы и методика организации мониторинга крупных городов / Г. К. Бондарик [и др.]. М.: ПНИИИС, 2009. 259 с.
3. Овечкина О. Н. Оценка и прогноз изменения состояния геологической среды при техногенном воздействии зданий высотной конструкции в пределах города Екатеринбурга: дис. … канд. геол.-минерал. наук. Екатеринбург: УГГУ, 2013. 159 с.
4. Гуляев А. Н., Осипова А. Ю. Районирование центральной части Уральского региона по величине расчетной силы сейсмического воздействия. Екатеринбург: УрО РАН, 2020. 89 с.
5. Богов С. Г. Применение цементных растворов для струйной технологии закрепления грунтов с учетом их реологических свойств // Гидротехника. 2013. № 4. С. 84–86.
6. Богов С. Г. Адаптация струйной технологии для целей освоения подземного пространства в исторической части Санкт-Петербурга в условиях слабых грунтов // Жилищное строительство. 2014. № 3. С. 25–30.
7. Улицкий В. М., Богов С. Г. Опыт эффективного применения струйной цементации в геотехнической практике Санкт-Петербурга при реконструкции и новом строительстве // Геотехника. 2017. № 4. С. 16–25.
8. Ground improvement. Ed. by M. P. Moseley, K. Kirsch. London, 2004. 440 p. https://doi.org/10.1201/9780203489611
9. Karol R. H. Chemical grouting and soil stabilization. Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers, 2003. 536 p.
10. Ибрагимов М. Н., Семкин В. В., Шапошников А. В. Цементация грунтов инъекцией растворов в строительстве. М.: Изд-во АСВ, 2017. 266 с.
11. Мониторинг зданий и сооружений при строительстве и эксплуатации (практическое руководство под ред. д-ра геол.-минерал. наук А. Г. Шашкина) / А. Г. Шашкин [и др.]. СПб: Изд-во ин-та «Георекострукция», 2021. 640 с.
12. Способ строительства и анализа напряженно-деформированного состояния зданий, сооружений и других протяженных по вертикали объектов на неравномерно сжимаемых грунтах: пат. 2476642 Рос. Федерация / В. В. Лушников, Ю. Р. Оржеховский, А. Я. Эпп, М. В. Сметанин; опубл. 27.02.13, Бюл. № 6.
13. Алехин А. Н. Обоснование метода определения параметров нелинейной модели грунта по данным его полевых испытаний // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. 2015. № 1. С. 57–62.
14. Алехин А. Н., Алехин А. А. Фундамент и его грунтовое основание – неотъемлемая несущая часть здания // Стройкомплекс Среднего Урала. 2021. № 245 (05). С. 32–33.
15. Alekhin A. N., Alekhin A. A., Alekhin V. N. Experience in designing the foundations of a multi-storey building on the eluvial soils of the Urals using a model of non-linear soil deformation // Safety Problems of Civil Engineering Critical Infrastructures: International Conference. Ekaterinburg, 2019. Vol. 972. Article number 012016. https://doi.org/10.1088/1757-899X/972/1/012016
16. Маковецкий О. А. Расчет и конструирование искусственного основания «структурный геотехнический массив»: дис. …канд. техн. наук. М.: МИИТ, 2021. 363 с.
17. Travush V. I., Fedorov V. S., Makovetskiy O. A. Theoretical substantiation of the mechanism patterns of the manmade base “structural geotechnical solid” // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2020. Vol. 16. No. 4. P. 103–110. https://doi.org/10.22337/2587-9618-2020-16-4-103-110

Статья поступила в редакцию 03 ноября 2023 года

UDC 624.131.1, 624.131.7 http://doi.org/10.21440/2307-2091-2024-1-121-136

Analysis of the result of using a geotechnogenic massif in complex engineering and geological conditions of the city of Ekaterinburg

Ol'ga Nikolaevna OVECHKINA*

LLC "Scientific Research Center "StroiGeoSreda", Ekaterinburg, Russia

Abstract

Relevance. In connection with the development of new territories on the outskirts of the city of Ekaterinburg (microdistricts Akademicheskiy, Michurinsky, Solnechny, etc.), as well as development within wetlands and flooded areas, new technologies for constructing foundations are being used. To prevent emergency situations and negative consequences of the manifestation of engineering-geological processes and phenomena, the construction and operation of any buildings and structures must be carried out in strict accordance with the design solution. Therefore, the most pressing problem in developing design solutions for building foundation structures is ensuring geotechnical and geomechanical safety. Choosing a method for designing a monolithic slab on a geo-technogenic massif requires particularly careful calculations of all components of the project. Despite the significant number of existing buildings, experience in studying engineering-geological conditions and their influence on the choice of construction technology, a special approach is required when studying each individual construction site. This is due both to the complex engineering and geological conditions of the city of Ekaterinburg, formed as a result of the long and complex history of the geological development of the Urals, and to the increased responsibility of the designed capital construction projects.

The purpose of the research is to study the components of the natural-technical system of a sixteen-story emergency building located in Ekaterinburg, to determine the causes of uneven soil deformations at the base of the foundation slab on a geotechnogenic massif.

Research methods. Study, analysis and synthesis of geotechnical, design and construction materials on an emergency building; visual inspection of building structures; photo documentation; geodetic monitoring.

Results. The components of the interaction between the geological environment and the emergency building were determined, specific soils were identified that determine the unstable state of the technical structure; the stages of construction, creation of a geotechnogenic massif, soil strengthening and geodetic observations of settlements are considered; The causes of uneven deformations have been established.

Conclusions. The uneven settlements of the sixteen-story building are associated with an initially unsuccessful and risky project that did not meet the engineering and geological conditions of the construction site.

***Keywords*:** natural-technical system, specific soils, slab foundation, jet cementation, geotechnogenic massif.

REFERENCES

1. Lushnikov V. V. 2019, A word about the foundation, or the foundation of a building as an analogue of the supports of nature's creations. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura* [Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Construction and Architecture], vol. 10, no. 2, pp. 14–25. (*In Russ.*) https://doi.org/10.15593/2224-9826/2019.2.02
2. Bondarik G. K. 2009, Scientific foundations and methods of organizing monitoring of large cities. Moscow, 259 p. (*In Russ.*)
3. Ovechkina O. N. 2013, Assessment and forecast of changes in the state of the geological environment under the technogenic impact of high-rise buildings within the city of Ekaterinburg, PhD thesis. Ekaterinburg, 159 p. (*In Russ.*)
4. Gulyaev A. N., Osipova A. Yu. 2020, Zoning of the central part of the Ural region according to the magnitude of the calculated force of seismic impact. Ekaterinburg, 89 p. (*In Russ.*)
5. Bogov S. G. 2013, Application of cement mortars for jet technology of soil consolidation, taking into account their rheological properties. *Gidrotekhnika* [Hydraulic Engineering], no. 4, pp. 84–86. (*In Russ.*)
6. Bogov S. G. 2014, Adaptation of jet technology for the purpose of developing underground space in the historical part of St. Petersburg in soft soil conditions. *Zhilishchnoye stroitel'stvo* [Housing Construction], no. 3, pp. 25–30. (*In Russ.*)
7. Ulitsky V. M., Bogov S. G. 2017, Experience of effective use of jet cementation in geotechnical practice of St. Petersburg during reconstruction and new construction. *Geotehnika* [Geotechnics], no. 4, pp. 16–25. (*In Russ.*)
8. Moseley M. P., Kirsch K. 2004, Ground improvement. London, 440 p. https://doi.org/10.1201/9780203489611
9. Karol R. H. 2003, Chemical grouting and soil stabilization. Reston, Virginia, 536 p.
10. Ibragimov M. N., Semkin V. V., Shaposhnikov A. V. 2017, Cementation of soils by injection of solutions in construction. Moscow, 266 p. (*In Russ.*)
11. Shashkin A. G. 2021, Monitoring of buildings and equipment in construction and operation. St.-Petersburg, 640 p. (*In Russ.*)
12. Lushnikov V. V., Orzhekhovsky Yu. R., Epp A. Ya., Smetanin M. V. 2013, A method for constructing and analyzing the stress-strain state of buildings, structures and other vertically extended objects on unevenly compressible soils, bulletin no. 6. (*In Russ.*)

✉oon5316@mail.ru
https://orcid.org/0009-0003-8087-5738

13. Alekhin A. N. 2015, Justification of the method for determining the parameters of a nonlinear soil model based on data from its field tests. *Akademicheskiy vestnik UralNIIproyekt RAASN* [Academic bulletin UralNIIproekt RAASN], no. 1, pp. 57–62. (*In Russ*.)
14. Alekhin A. N., Alekhin A. A. 2021, The building foundation and its soil foundation are an integral load-bearing part of the building. *Stroykompleks Srednego Urala* [Construction complex of the Middle Urals], no. 245 (05), pp. 32–33. (*In Russ*.)
15. Alekhin A. N., Alekhin A. A., Alekhin V. N. 2019, Experience in designing the foundations of a multi-storey building on the eluvial soils of the Urals using a model of non-linear soil deformation. *Safety Problems of Civil Engineering Critical Infrastructures: International Conference*. Ekaterinburg, vol. 972, article number 012016. https://doi.org/10.1088/1757-899X/972/1/012016
16. Makovetskiy O. A. 2021, Calculation and design of an artificial foundation "structural geotechnical massif", PhD thesis. Moscow, 363 p. (*In Russ*.)
17. Travush V. I., Fedorov V. S., Makovetskiy O. A. 2020, Theoretical substantiation of the mechanism patterns of the manmade base "structural geotechnical solid". *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, vol. 16, no. 4, pp. 103–110. https://doi.org/10.22337/2587-9618-2020-16-4-103-110

The article was received on November 01, 2023

Экономические науки
Econonic sciences

UDC 330.15 http://doi.org/10.21440/2307-2091-2024-1-137-146

Solving the waste problem from the perspective of conceptual provisions of the use of natural resources

Margarita Nikolaevna IGNAT'EVA*
Irina Vladimirovna DROZDOVA**
Oksana Gennad'evna KOMAROVA**
Irina Vladislavovna PEREGON**

Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia

Abstract

Relevance. Mining in all cases is accompanied by the formation of waste – man-made mineral formations (MMFs) and their volume is greater, the faster the scale of mining production increases. Under these conditions, the importance of the problem of waste management and the need to establish trends in its development increase.
The purpose of the study is to assess the current state of affairs in the field of solid waste management and identify trends in the implementation of this activity.
Research methods are systematic approach, methods of analogies, comparisons, logical analysis.
Results. The increasing importance of MMFs, the mineral resources and environmental aspects of the latter has been confirmed. Changes in waste management are analyzed in relation to conceptual provisions regarding the use of natural resources. The analysis covers: the concept of rational and integrated use of natural resources, the concept of eco-development, waste-free production, sustainable development, the concept of clean production, and the circular economy. An increase in attention to the problem of waste has been revealed, which from objects accompanying mineral resources are gradually turning into objects of priority importance.
This trend is confirmed by changes in conceptual provisions that replace each other in the historical aspect, the role of technogenic deposits in expanding the mineral resource base, as well as the possibility of improving the environmental situation through the elimination of MMFs during their use.
Conclusion. The identified changes in the management of MMFs confirm the priority of this activity at the present stage and the increasing importance of processing solid waste in order to expand the mineral resource base and improve the quality of the environment.

***Keywords*:** concepts, time aspect, natural resources, man-made mineral formations, priorities.

Introduction

The development of the world economy is accompanied by a progressive increase in the use of mineral resources. Over the past 40 years, 80–85% of oil and gas from the total volume of their production in the entire history of human civilization has been used. For other types of mineral raw materials, the growth in use volumes increased by 3–5 times. In general, the volume of production and consumption of mineral raw materials increases annually and one cannot expect a change in this situation. Naturally, the extraction of minerals is accompanied by the excavation of waste rock to the surface, the mass of which depends on the method of extracting the mineral, the development system, etc. The volume of waste accumulation on the territory of the Russian Federation is about 100 billion tons, and their annual increase is no less than 5 billion tons. Under these conditions, the problem of using Man-made mineral formations (MMFs) becomes urgent.

The greatest interest from the point of view of expanding the mineral resource base is represented by MMFs containing useful components suitable for cost-effective extraction – technogenic deposits (TM), especially since the processing of MMFs provides the opportunity to eliminate sources of negative impact on the environment, improve the human environment, and preserve "health" of ecosystems. An example is single-industry towns with a mining profile, in which MMFs are located within the boundaries of urban areas and serves as a source of deterioration in the health of the population. The correlation between environmental pollution and the increase in diseases and mortality has been confirmed by numerous studies.

✉rinis@mail.ru
http://orcid.org/0000-0001-9014-905X
**ief.em@m.ursmu.ru

Despite the importance of MMFs, the degree of attention to the waste problem does not remain constant: it is either updated or loses its urgency. One of the reasons for this attitude to the problem of waste management is changes in conceptual provisions regarding the use of natural resources in a temporary aspect.

Results

Changes in waste management activities required an analysis of the concepts that define the conditions for the use of natural resources, replacing each other in a temporal aspect. So, in the mid-60s of the XX century leading Soviet scientist D. L. Armand outlined in his book [1] a new approach to the use of natural resources, which he defined as "correct (rational) environmental management, defined as a careful attitude towards natural resources, presupposing their increased involvement in expanded economic use, accompanied by expanded reproduction, and protecting them from unreasonable, wasteful and predatory use.

Among the principles of rational exploitation and restoration of natural resources he included:

– involvement of natural resources in the national economy in different quantities and in different ways, depending on the natural and economic conditions of each area;

– the ability to foresee the consequences of each change made by man to one aspect of nature, to take into account its impact on all other aspects and sectors of the economy;

– expedient order of involvement of natural resources in the national economy;

– expanded reproduction of renewable resources;

– comprehensive and economical, i.e. without technically unjustified waste and loss of non-renewable resources;

– maintaining a qualitatively high level and rational redistribution in space and time of inexhaustible resources;

– creation of the best working conditions, recreation and health improvement for the population;

– transformation of nature, i.e. the creation of landscapes that are more productive and more appropriate to the needs of a socialist society than the original natural ones;

– preservation of scientific and aesthetic values created by nature and which are the pride of every people who loves their land;

– further decoration of the landscape and bringing it into a harmonious whole with architectural ensembles" [1].

As presented by D. L. Armand, rational environmental management presupposes, firstly, the complete use of non-renewable resources, excluding unreasonable losses and minimizing the generation of waste. Secondly, expanded reproduction of renewable resources; thirdly, taking into account possible consequences associated with changes in nature during subsoil development. Natural resources, according to D. L. Armand, should be involved not in economic use, but "in economic circulation, i. e. into a cycle of expenditure and renewal". The problem of waste does not remain unsolved. The systematic growth of industrial production actualizes the problem of supply of raw materials and disposal of waste, the amount of which is also growing. The concept of rational environmental management, which anticipated the concept of sustainable development, is also, like the latter, focused on balancing the interests of present and future generations in the use of natural resources, i. e. "the moral duty of each generation is to leave natural resources to the next in better condition and in greater quantities than it received from the previous one" [1].

In the development of the ideas underlying the concept of rational environmental management, in addition to D. L. Armanda took part: Yu. K. Efremov, Yu. N. Kurazhskovsky, N. F. Reimers, V. A. Anuchin et al. [2, 3]. The author [3] defines rational environmental management as "a system of activities designed to ensure the economical exploitation of resources and conditions and the most effective mode of their reproduction, taking into account the long-term interests of the economy and the preservation of human health". Rational use of natural resources presupposes the fullest possible extraction of all useful products from them, causing the least harm to economic sectors based on the same resource, and to the state of the natural environment necessary for human life.

In the definition of the authors [4] "rational use of mineral resources means the most complete and comprehensive extraction of minerals from the subsoil during mining (losses should not exceed economic limits), comprehensive extraction of mineral raw materials and fuel during their enrichment, processing and consumption, use of by-products and production waste, the most rational organization of transportation of raw materials at all stages of production, timely implementation of measures to restore the earth's surface, etc.". The ideas of rational environmental management quickly penetrated into the sphere of public administration and began to be used at the sectoral level (rational land use, rational water use, rational subsoil use, etc.) [5]. The economic branch of the concept is gradually gaining strength, in the development of which the following people took part: S. G. Strumilin, N. P. Fedorenko, P. G. Oldak et al.

Over time, the conditions for rational environmental management have undergone quite expected changes, but the idea of the concept – the preservation of natural capital – has remained unchanged [6].

In the new version of the conceptual provisions of rational environmental management, the social aspect plays a significant role, the need for payment for environmental management and the creation of protected areas for the purpose of direct protection of the most valuable of them are noted. As before, the problem of waste is considered only from the point of view of minimizing its volume in order to reduce the anthropogenic impact on the environment and represents one of the conditions for rational environmental management. The secondary importance of this problem is evidenced by the fact that among the priorities of Russia's national environmental policy (2009), the waste problem, as before, is not reflected [7].

The same period dates back to the addition of its concept of integrated use of raw materials and subsoil, aimed at the complete extraction of minerals from the subsoil and useful components from mineral raw materials [8–10], the basis of which is the multicomponent nature of most types of minerals, their uneven distribution in the earth bark and differences in quality. In each specific type, the target (main) component is in a genetic connection with a number of other components. Coal is accompanied by sulfur, methane and germanium, iron ores – vanadium, germanium, phosphorus, titanium, sulfur, etc. A great contribution to the development of ideas for the integrated use of mineral resources was made by N. V. Melnikov, A. V. Sidorenko, M. I. Agoshkov, N. A. Bykhover,

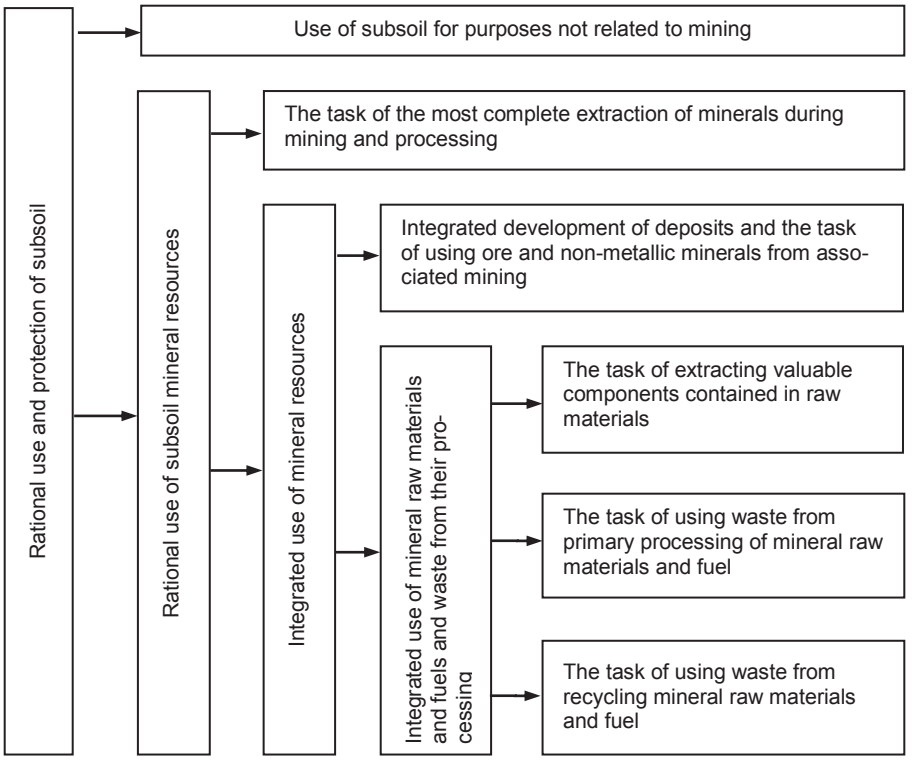


Figure 1. Scheme of subordination of the integrated and rational use of mineral resources [12]
Рисунок 1. Схема соподчиненности комплексного и рационального использования минеральных ресурсов [12]

N. G. Feitelman, Yu. V. Yakovets and others. Certain aspects of the problem are studied in the works of I. P. Zhavoronkova, V. N. Vinogradov, V. N. Leksin, M. A. Sergeev et al. The subordination of the problems of integrated use of mineral resources (IUMR) and rational use is reflected in fig. 1.

At the stage of the 80s, the content of IUMR expanded, the coverage of resource cycles of the use of mineral resources extended to all stages of their processing, as a result, the problems of recycling industrial waste were included in the general problems. However, this concept, like the concept of rational subsoil use, remains aimed primarily at natural mineral resources, since in the period 60–70, according to the authors [11], human activity in relation to the use of solid waste was just beginning.

The complexity of the use of raw materials is determined by technologies that ensure the profitability of obtaining products from raw materials, the quantity and quality of which corresponds to the maximum possible at the appropriate level of development of science and technology [13]. If the concept of rational subsoil use predetermines resource conservation by reducing the volume of mineral resources used, then the integrated use of raw materials and subsoil is focused on the complete extraction of minerals and useful components, which also helps to preserve non-renewable natural resources [4, 14]. Initially, rational, as well as integrated use of natural resources, including mineral resources, were considered as independent conceptual provisions; later, the requirement of complexity becomes one of the conditions for rational use [12].

The beginning of the 70s dates back to the emergence of the concept of eco-development, voiced at the First World Conference on Environment and Development in Stockholm in 1972. Eco-development as interpreted by researchers is "environmentally oriented socio-economic development, in which the growth of people's well-being is not accompanied by environmental deterioration habitat and degradation of natural systems". The development of the concept is a response to the deteriorating environmental situation, accompanied by an increase in morbidity and mortality of the population. The main idea of eco-development was to achieve environmental safety by taking into account the environmental factor in any decision-making. The fundamental principles of forming the concept of eco-development include the following:

– regional and local tasks of eco-development should be subordinated to global and national goals of preventing environmental disaster and optimizing the human environment (the principle of "thinking globally – acting locally");

– eco-development presupposes the need to prevent unfavorable environmental trends or provides a guarantee of their minimization (the principle "ignorance of the consequences does not relieve society from responsibility for the destruction of the natural environment");

– the goals of eco-development are primary in relation to the goals of economic development (the principle of the environmental imperative);

– the placement and development of material production in a certain territory must be carried out in accordance with its environmental technology intensity (the principle of environmental and economic balance);

– the environmental safety of a society is closely related to the level of culture, education and upbringing of people in this society.

All the principles under consideration are aimed at the integration of economy and nature, the creation of balanced ecological and economic systems, and the comparison of tech-

nogenic load with the environmental technological intensity of the territory. The thesis that existed at that time about the advisability of economic growth without any restrictions was criticized. The existence of strict environmental restrictions (limits) to economic development has been strongly argued [15].

The idea of balance was continued in the works of V. G. Ignatov, A. V. Kokin, L. A. Baturin, V. G. Ignatov, A. V. Kokin, P. G. Oldak [16], N. P. Golubetskaya [17] and others, including in relation to environmental management. For the first time, the requirement to establish environmental restrictions during economic development and strict control over their compliance was justified. Subsequently, the requirement for balance, as well as the complexity of the use of raw materials and subsoil, was included among the fundamental principles of rational subsoil use. There is no waste as a direct object of regulation in the concept of ecodevelopment. Indirectly related to them is only the requirement to comply with environmental restrictions (not exceeding the assimilation capacity of the territory where the waste is disposed).

In the first half of the 80s, the concept of waste-free production became widespread, which, in relation to subsoil use, assumed the full use of mineral raw materials, including waste, as subsoil resources. The basis of waste-free production is the use of waste-free technology, which is defined by the author [18] as "the principle of functioning of the national economy, region, industry, production, in which all components of raw materials and energy are rationally used in the cycle primary raw materials of production–consumption–secondary raw materials and the ecological balance is not disturbed". Low-waste technology occupies an intermediate stage in creating waste-free production.

In accordance with the Declaration on Low-Waste and Zero-Waste Technologies and Waste Management adopted by the ECE Environment (Geneva, 1979), zero-waste technology is defined as "the practical application of knowledge, methods and means in order to provide, within the framework of human needs, the most rational use of natural resources and energy and protect the environment" [19]. In a number of Western European countries, instead of low- and waste-free technology, the term "clean" or "cleaner technology" is used, which is essentially the same thing. "Clean technology, in their definition, is a method of producing products using the most rational use of raw materials and energy, which allows simultaneously reducing the volume of pollutants released into the environment and the amount of waste generated during the production and operation of the manufactured product" [11]. The concept of waste-free production continues to consider primary mineral resources as the main object of regulation. With regard to solid waste, the task is to reduce their formation "at the end of the pipe". Waste recycling, according to the authors [11], "is a separate process closely related to waste-free production." At the same time, when defining a waste-free technology, the authors of [11] believe that it should comprehensively process raw materials and dispose of the bulk of the waste within economically feasible limits.

The next stage in the development of mining waste management activities dates back to the early 90s and the emergence of the concept of sustainable development, the adherence of which, along with other countries, was recognized by Russia [20]. The concept of sustainable development defines a new stage in economic development, a transition to economic development that is safe for the environment. Sustainable development is a model of socio-economic development in which the vital needs of the present generation of people are met without future generations being deprived of this opportunity due to depletion of natural resources and environmental degradation [21]. The key issue in implementing the concept is the balance of the ecological, economic and social subsystems [22–24], which primarily involves balancing economic development with the requirement to preserve the "health of ecosystems", which is reflected in the conceptual provisions regarding the use of natural resources (Table 1).

The criteria under consideration allow us to conclude that for the first time, mining waste is considered as an independent object of regulation along with primary mineral resources. The formed requirements in relation to waste relate to minimizing its formation, maximizing its use and preventing environmental limits from being exceeded, which can lead to a deterioration in the environmental situation of the territory. The requirement to reduce the mass of waste is aimed at reducing the negative impact of the latter on the environment, i. e. the mineral and raw materials aspect of waste remains not particularly in demand.

In the second half of the 90s, the problem of waste turned out to be directly related to the concept of environmentally friendly production [25, 26], which is considered as the completion of the process of transformation in the system of environmental protection measures. EFP covers all aspects of production (Fig. 2).

It assumes:

– reduction at source and reuse of waste on site (in the same technological process or another, but within the enterprise);

– production of environmentally friendly products, which, whenever possible, are made from renewable raw materials and secondary materials.

The basic principles of EFP include:

– locality – the manifestation and negative impact of pollutants is limited only by the place of their formation;

– preventiveness – the formation of pollutants or their negative impact is prevented at stages preceding their possible appearance, including the receipt of raw materials or semi-finished products;

– the beginning and end of the pipe – the entire technological process is presented conditionally in the form of a "pipe" and the analysis of the formation of pollutants is carried out starting from the end of the pipe and moving towards its beginning while simultaneously identifying and separating the places where certain contaminants appear;

– waste flow – a set of liquid, solid and aerosol substances generated during technological processes and transported through various highways to general treatment facilities or outside the production area;

– the end of the waste transport line – the final part of the waste transport line at the enterprise, after which the mixed waste is not separated or processed, but only sent to natural objects or general treatment facilities;

– systematicity – a clean production scheme that takes into account the entire production process from raw materials

Table 1. Criteria for sustainable development
Таблица 1. Критерии устойчивого развития

Authors	Criterion 1	Criterion 2	Criterion 3	Criterion 4
1. S. N. Bobylev	The amount of renewable natural resources or the ability to produce biomass should at least not decrease over time, i.e. provide simple reproduction mode	The maximum possibility of slowing down the rate of depletion of reserves, with the prospect of replacing them in the future with other unlimited resources	Possibility of minimizing the amount of waste based on low-waste resource-saving technologies	Environmental pollution in the future should not exceed its current level; it should be possible to minimize pollution to a socially and economically acceptable level
2. E. V. Girusov	The amount of renewable natural resources or their ability to produce biomass should at least not decrease over time, i.e. at least a simple reproduction regime must be ensured	Slowing down the rate of depletion of non-renewable natural resources with their possible replacement in the future with unlimited types of resources	Minimizing waste generation based on the introduction of low-waste resource-saving technologies	Environmental pollution in the future should not exceed its current level. Possibility of minimizing pollution to socially and economically acceptable levels
3. I. I. Drogomiretsky, E. L. Kantor, L. A. Chikatueva [27]	Preservation of the amount of renewable natural resources, their ability to produce biomass (at least simple reproduction) must be ensured)	Slowing down the rate of depletion of non-renewable natural resources as much as possible	Possibility of waste minimization based on the introduction of low-waste, resource-saving technologies	Environmental pollution (total and by type) should not exceed its current level
4. A. P. Moskalenko [et al.]	Ensuring at least a regime of simple reproduction of renewable natural resources, their quantity or the ability to produce biomass should not decrease over time	Maximizing the slowdown in the rate of depletion of non-renewable natural resources with the prospect of their replacement with alternative or other unlimited resources in the future	Minimization of waste from production activities based on the implementation of low-waste, energy- and resource-saving technologies, technological chains of complex and (or) deep processing of raw materials, integrated use of energy, recycling of consumer waste	Minimize pollution to socially and economically acceptable levels. In the future, at a minimum, total and structural pollution should not exceed current levels
5. N. N. Yashalova, D. A. Ruban [28]	The amount of renewable natural resources and their ability to produce biomass should not decrease over time, i. e. simple reproduction regime must be ensured	The maximum possible slowdown in the rate of depletion of non-renewable natural resources with the prospect of their replacement with other unlimited types of resources	Possibility of waste minimization based on the use of low-waste and resource-saving technologies	Environmental pollution in the future should not exceed its current level

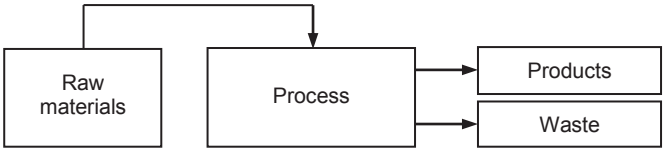


Figure 2. Objects affected by EFP
Рисунок 2. Объекты воздействия ЭЧП

to finished products (energy, services) and includes measures at all stages of this process to develop economically feasible ways to prevent, neutralize or recycle pollutants with an assessment of the resulting environmental and economic effects. An ideal clean production scheme has no treatment facilities or waste storage areas;

– the "3P" principle – preventing environmental pollution is more profitable than paying penalties for this pollution. The abbreviation "3P" is a combination of the words "prevention, pollution and payment", which means "preventing pollution is beneficial" [25].

The EFP strategy considers waste as raw materials and auxiliary materials that are lost during the production process. Therefore, the goal is to find opportunities to use them if the possibility of prevention turned out to be impossible. Although, according to the UN Environment Program, up to 70% of all waste can be prevented. The list of ways aimed at minimizing waste is shown in Fig. 3.

Achieving EFP goals, in particular, becomes possible with the use of appropriate technologies, i. e. the EFP concept corresponds to the strategy of "best existing technologies" or "best available technologies" (BAT) [29, 30]. The goal of introducing BAT is an integrated approach to the problem of pollution, when all components of the natural environment (air, water and soil) are considered together, in contrast to the traditional approach, which involves considering one of the components of the natural environment [30]. An important novelty is the abandonment of the current system of standardization of impacts on individual components of the environment, established individually for specific natural resource users, and the transition to technological standardization.

Technologies classified as BAT must ensure protection of the environment as a whole, and not its individual components. Nature users have the right to choose any of the technologies, provided that its impact on the environment does not exceed the technological standards determined for this BAT process [29]. In the EFP concept, the problem of waste plays one of the leading roles in creating environmentally friendly subsoil use. A positive aspect of the EFP concept is the requirement to reduce waste "at the beginning of the pipe", i. e. at the beginning of the production process, which eliminates the growing volumes of environmental costs associated with the elimination or reduction of waste "at the end of the pipe". The EFP concept is considered as a development of the concept of waste-free production, in which the problem of waste is actualized. Russia has signed the International Declaration of Cleaner Production, proposed by UNEP in 2001 as the main document defining the role of this concept in ensuring sustainable development of society. A number of notions of the concept have determined the main directions of economic development and environmental protection in Russia [31, 32], however, these provisions still remain declarations that are not provided with regulatory, organizational and financial support from the state and extremely limited from business [33].

Period 2010–2015 is characterized by the spread of the idea of the concept of a circular economy (CE) (closed-cycle economy), the subject of which in subsoil use is waste [34–37]. Waste management is becoming one of the priority areas of the circular economy, because its main principle is to ensure maximum efficiency from each process in the life cycle of a product or service. This type of economy is characterized by the "3Rs" – Reduce, Reuse and Recycle: optimization of the production process, reuse or sharing of the product, waste recycling [38, 39]. It should be noted that the idea of closed cycles is not new; the tasks of a gradual universal transition to closed technological cycles were considered at all-Union meetings on the problems of waste-free production at the Noginsk Scientific Center of the USSR Academy of Sciences and in Voroshilovgrad back in 1977–1978. Under the circular economy, the authors [34] understand "an economy that uses resources as efficiently as possible and uses closed loops as often as possible". The most cited definition given by the E. MacArthur Foundation is an economy that is restorative and circular in nature, involving the creation of a continuous development cycle that reduces natural capital and increases its value, increasing the return on resources by optimizing their use [40]. The field of mining is considered by domestic and foreign researchers as potentially suitable for the implementation of CE, but is far from a priority [38].

For subsoil use conditions, the most acceptable CE business models are:

– circular value chains;

– a model in which limited resources are replaced with completely renewable ones;

– recovery and recycling – models that provide for the recovery and reuse of resources on the basis of technological innovations (closed waste recycling cycle).

Business models for introducing waste recycling technologies and using secondary resources can be effective, and the organization of business models should be interconnected with the use of BAT. In fact, CE promotes the transition to BAT.

According to [37], there are three components of this economy: complete circulation of materials; extending the cycle of resource use; efficient use of renewable energy.

Waste recycling, as follows from the concept of CE, prevents waste disposal and reduces the extraction of primary natural resources. The transformation of waste into a secondary resource is stimulated and the process of technological renewal is accelerated.

Conclusion

As follows from the analysis, firstly, the development of activities for the management of solid waste is interconnected

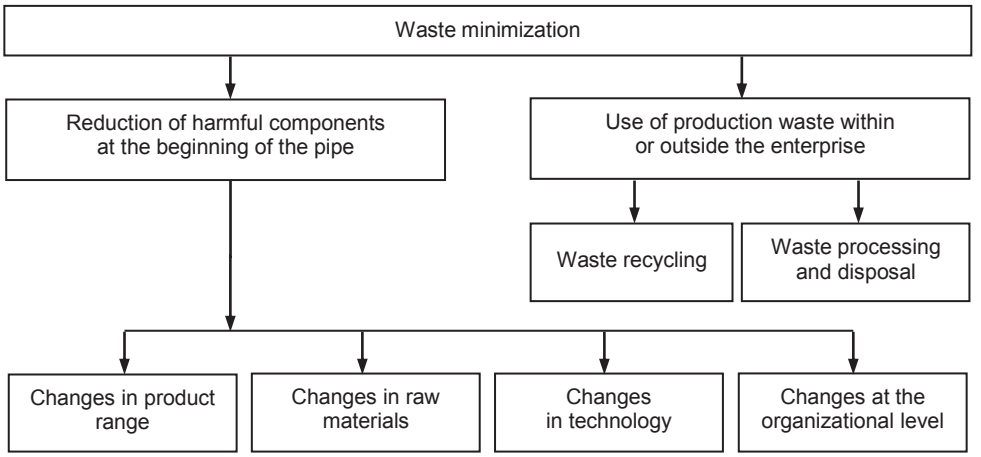


Figure 3. Main ways to minimize waste
Рисунок 3. Основные пути минимизации отходов

with changes in conceptual provisions of the use of natural resources. Secondly, MMFs from among the secondary objects of regulation have over time become the main ones, and the problem of solid waste management is becoming a priority. Thirdly, in the analyzed concepts until the early 90s, solid waste was considered primarily from the perspective of environmental pollutants, and measures to reduce the negative impact on the environment were linked to the "end of the pipe". Active actions regarding MMFs are carried out only from the moment of their formation, i. e. when they leave the production sphere in the form of waste. In general, this activity does not give the desired results, because impact requirements are constantly becoming more stringent and the costs of achieving them are rising. Fourthly, in the concept of sustainable development, among the requirements for the use of natural resources, solid waste is for the first time considered as independent objects on a par with natural mineral resources, and the requirements for their minimization are linked to the "beginning of the pipe". Fifthly, over time, the mineral resource aspect of MMFs becomes increasingly important.

REFERENCES

1. Armand D. L. 1964, For us and our grandchildren. Moscow, 180 p. (*In Russ.*)
2. Anuchin V. A. 1978, Fundamentals of environmental management. Theoretical aspect. Moscow, 296 p. (*In Russ.*)
3. Reimers N. F. 1990, Nature management: Dictionary-reference book. Moscow, 637 p. (*In Russ.*)
4. Podvishensky S. N., Chalov V. I., Kravchino O. P. 1988, Rational use of natural resources in the mining complex. Moscow, 228 p. (*In Russ.*)
5. Slipenchuk M. V. 2010, Rational environmental management: theory, practice, education. Moscow, 260 p. (*In Russ.*)
6. Pevzner M. E. 2002, Rational use of mineral resources in modern subsoil use. *Gornyy zhurnal* [Mining journal], no. 1, pp. 12–17. (*In Russ.*)
7. Zakharov V. M. 2009, Priorities of the national environmental policy of Russia. Moscow, 152 p. (*In Russ.*)
8. Kyabbi M. E. 1984, Economic mechanism for integrated subsoil development. Moscow, 200 p. (*In Russ.*)
9. Sagimbayev E. F., Larichkin S. N. 1974, Integrated use of raw materials in lead and zinc plants. *Tsvetnaya metallurgiya* [Non-ferrous metallurgy], no. 12, pp. 4–5. (*In Russ.*)
10. Snurnikov A. P. 1977, Integrated use of raw materials in non-ferrous metallurgy. Moscow, 272 p. (*In Russ.*)
11. 1981, Results of science and technology. Nature protection and reproduction of natural resources, vol. 9. Moscow, 217 p. (*In Russ.*)
12. Pedan M. P., Mishchenko V. S. 1981, Integrated use of mineral resources. Kyiv, 272 p. (*In Russ.*)
13. Laskorin B. N., Barsky L. A., Persits V. Z. 1984, Waste-free technology for processing mineral raw materials: system analysis. Moscow, 334 p. (*In Russ.*)
14. Melnikov N. V. 1969, Scientific problems of rational use of mineral resources of the USSR. Moscow, 39 p. (*In Russ.*)
15. Meadows D. H. [et al.]. 1972, The Limits to growth: A report to the Club of Rome's project on the predicament of mankind. N. Y., 205 p.
16. Oldak P. G. 1983, Equilibrium environmental management: An economist's view. Novosibirsk, 128 p. (*In Russ.*)
17. Golubetskaya N. P. 2001, Balanced environmental management in a transition economy, PhD thesis. Saint Petersburg, 218 p. (*In Russ.*)
18. 1983, Results of science and technology. Nature protection and reproduction of natural resources, vol. 11. Moscow, 212 p. (*In Russ.*)
19. 1980, Declaration on low-waste and waste-free technology and waste use. *Khimiya i zhizn'* [Chemistry and Life], no. 4, pp. 24–28. (*In Russ.*)
20. Yablokov A. V. 1997, Environmental policy of the Russian government. *Ustoychivoye razvitiye* [Sustainable Development], no. 2, pp. 12–13. (*In Russ.*)
21. Danilov-Danilyan V. I., Losev K. S. 1999, Sustainable development assumptions. *Ustoychivoye razvitiye* [Sustainable development], Moscow, no. 4, pp. 3–9. (*In Russ.*)
22. Danilov-Danilyan V. I. 2000, Environmental challenge and sustainable development. Moscow, 416 p. (*In Russ.*)
23. 1993, Declaration of Rio de Janeiro. *Zelenyy mir* [Green World], no. 3. (*In Russ.*)
24. Lukyanchikov N. N. 1995, A new path for Russia's development. Moscow, 96 p. (*In Russ.*)
25. 1998, Guidelines for environmentally friendly production. Moscow, 130 p. (*In Russ.*)
26. 1999, Russian-Norwegian Cleaner Production program. Moscow, 135 p. (*In Russ.*)
27. Drogomiretsky I. I., Kantor E. L., Chikatueva L. A. 2011, Economics and management in the use and protection of natural resources. Rostov-on-Don, 536 p. (*In Russ.*)
28. Yashalova N. N., Ruban D. A. 2014, The special significance of the environmental factor for the sustainable development of the national economy: conceptual analysis. *Natsional'nyye interesy, prioritety i bezopasnost'* [National interests, priorities and security], no. 4, pp. 20–30. (*In Russ.*)

29. Begak M. V. 2009, BAT: effective, accessible, productive. *EKO-byulleten' inzhenerno-ekonomicheskaya akademiya* [ECO-bulletin Engineering and Economic Academy], no. 3 (134), pp. 16–19. (*In Russ*.)
30. Oshchepkova A. Z. 2014, Technology rationing: how to determine the best available technologies. *Ekologiya proizvodstva* [Ecology of Production], no. 1, pp. 46–52. (*In Russ*.)
31. 2002, Priority areas for the development of science, technology and engineering in the Russian Federation, no. Пр-577. (*In Russ*.)
32. 2002, Environmental doctrine of the Russian Federation, no. 1225-p. (*In Russ*.)
33. Padalko O. V.2004, From waste management to resource management: two paths. *Problemy regional'noy ekologii* [Problems of regional ecology], no. 4, pp. 50–58. (*In Russ*.)
34. Dorokhina E. Yu., Kharchenko S. G. 2017, Circular economy: problems and development paths. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and industry of Russia], vol. 21, no. 3, pp. 50–55. (*In Russ*.) https://doi.org/10.18412/1816-0395-2017-3-50-55
35. Dorokhina E. Yu., Kharchenko S. G. 2017, Circular Economy Business Models as a Mechanism for Achieving Sustainable Development. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and industry of Russia], vol. 21, no. 7, pp. 58–61. (*In Russ*.) https://doi.org/10.18412/1816-0395-2017-7-58-61
36. Knysh V. A., Ivanova L. V. 2020, Circular economy: a threat to mining companies or a driver of their technological development? *Gornyy zhurnal* [Mining Journal], no. 9, pp. 33–41. (*In Russ*.) https://doi.org/10.17580/gzh.2020.09.04
37. 2014, Towards a circular economy: A zero waste program for Europe. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Brussels, COM (2014) 398 final. URZ. http://ec.Europa.eu/transpareney/regdog/rep/1/2014/EN/1-2014-338-EN-1/pdf
38. Pakhomova N. V., Richter K. K., Vetrova M. A. 2017, The transition to a circular economy and closed supply chains as a factor in sustainable development. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Ekonomika* [Bulletin of St. Petersburg University. Economy.], vol. 33, issue 2, pp. 244–268. https://doi.org/10.21638/11701/spbu05.2017.203
39. Ghisellini P., Cialani C., Ulgiati S. 2016, A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems in Journal of Cleaner Production, vol. 114, pp. 11–32. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.007
40. MacArthur E., Waughray D. 2016, Intelligent Assets: Unlocking the Circular Economy Potential. URL: https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/EllenMacArthurFoundation_Intelligent_Assets_088216.pdf

The article was received on January 10, 2024

УДК 330.15 http://doi.org/10.21440/2307-2091-2024-1-137-146

Решение проблемы отходов с позиции концептуальных положений по использованию природных ресурсов

Маргарита Николаевна ИГНАТЬЕВА*
Ирина Владимировна ДРОЗДОВА**
Оксана Геннадьевна КОМАРОВА**
Ирина Владиславовна ПЕРЕГОН**

Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия

Аннотация

Актуальность. Добыча полезных ископаемых во всех случаях сопровождается образованием отходов – техногенных минеральных образований (ТМО), и их объем тем больше, чем более высокими темпами увеличиваются масштабы горнодобывающего производства. В этих условиях возрастает значимость проблемы обращения с отходами, необходимость установления тенденций в ее развитии.

Цель исследования – оценка современного состояния в области обращения с ТМО и выявление тенденций в осуществлении этой деятельности.

Методы исследования – системный подход, методы аналогий, сравнения, логический анализ.

Результаты. Подтверждены возрастающая значимость ТМО, минерально-сырьевой и экологический аспект последних. Проанализированы изменения в обращении с отходами во взаимосвязи с концептуальными положениями, касающимися использования природных ресурсов. Анализом охвачены: концепция рационального и комплексного использования природных ресурсов, концепции экоразвития, безотходного производства, устойчивого развития, концепция чистого производства, циркулярной экономики. Выявлено возрастание внимания к проблеме отходов, которые из объектов, сопутствующих минеральным ресурсам, превращаются постепенно в объекты приоритетной значимости. Данная тенденция подтверждается изменениями в концептуальных положениях, сменяющих друг друга в историческом аспекте, ролью техногенных месторождений в расширении минерально-сырьевой базы, а также возможностью улучшения экологической ситуации за счет ликвидации ТМО при их использовании.

Заключение. Учет выявленных изменений в обращении с ТМО при формировании минерально-сырьевой базы страны, региона позволяет повысить достоверность прогноза геологоразведочных работ, в том числе геологического изучения ТМО.

***Ключевые слова*:** концепции, временной аспект, природные ресурсы, техногенные минеральные образования, приоритеты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Арманд Д. Л. Нам и внукам. М.: Мысль, 1964. 180 с.
2. Анучин В. А. Основы природопользования. Теоретический аспект. М.: Мысль, 1978. 296 с.
3. Реймерс Н. Ф. Природопользование: словарь-справочник. М.: Мысль, 1990. 637 с.
4. Подвишенский С. Н, Чалов В. И., Кравчино О. П. Рациональное использование природных ресурсов в горнопромышленном комплексе. М.: Недра, 1988. 228 с.
5. Рациональное природопользование: теория, практика, образование / под ред. М. В. Слипенчука. М., 2010. 260 с.
6. Певзнер М. Е. Рациональное использование минеральных ресурсов в современном недропользовании // Горный журнал. 2002. № 1. С. 12–17.
7. Приоритеты национальной экологической политики России / отв. ред. В. М. Захаров. М., 2009. 152 с.
8. Кябби М. Э. Экономический механизм комплексного освоения недр. М.: Недра, 1984. 200 с.
9. Сагимбаев Е. Ф., Ларичкин С. Н. Комплексное использование сырья на свинцовых и цинковых заводах // Цветная металлургия. 1974. № 12. С. 4–5.
10. Снурников А. П. Комплексное использование сырья в цветной металлургии. М.: Металлургия, 1977. 272 с.
11. Итоги науки и техники. Сер. «Охрана природы и воспроизводство природных ресурсов». М., 1981. Т. 9. 217 с.
12. Педан М. П., Мищенко В. С. Комплексное использование минеральных ресурсов. Киев: Наук. думка, 1981. 272 с.
13. Ласкорин Б. Н., Барский Л. А., Персиц В. З. Безотходная технология переработки минерального сырья: системный анализ. М.: Недра, 1984. 334 с.
14. Мельников Н. В. Научные проблемы рационального использования минеральных ресурсов СССР. М.: Недра, 1969. 39 с.
15. The Limits to growth / Meadows D. H. [et al.]: A report to the Club of Rome's project on the predicament of mankind. N. Y., 1972. 205 p.
16. Олдак П. Г. Равновесное природопользование: взгляд экономиста. Новосибирск: Наука, 1983. 128 с.
17. Голубецкая Н. П. Сбалансированное природопользование в условиях переходной экономики: дис. … д-ра экон. наук. СПб, 2001. 218 с.
18. Итоги науки и техники. Сер. «Охрана природы и воспроизводство природных ресурсов». М., 1983. Т. 11. 212 с.
19. Декларация о малоотходной и безотходной технологии и использовании отходов // Химия и жизнь. 1980. № 4. С. 24–28.

✉rinis@mail.ru
http://orcid.org/0000-0001-9014-905X
**ief.em@m.ursmu.ru

20. Яблоков А. В. Экологическая политика правительства России // Устойчивое развитие. 1997. № 2. С. 12–13.
21. Данилов-Данильян В. И., Лосев К. С. Исходные положения устойчивого развития // Устойчивое развитие: информ. сборник. М.: ВИНИТИ, 1999. № 4. С. 3–9.
22. Данилов-Данильян В. И. Экологический вызов и устойчивое развитие. М.: Прогресс-Традиция, 2000. 416 с.
23. Декларация Рио-де-Жанейро // Зеленый мир. 1993. № 3.
24. Лукьянчиков Н. Н. Новый путь развития России. М.: Изд-во «Тройка», 1995. 96 с.
25. Методические рекомендации по экологически чистому производству. М., 1998. 130 с.
26. Российско-Норвежская программа «Чистое производство». М., 1999. 135 с.
27. Дрогомирецкий И. И., Кантор Е. Л., Чикатуева Л. А. Экономика и управление в использовании и охране природных ресурсов. Ростов н/Д: Феникс, 2011. 536 с.
28. Яшалова Н. Н., Рубан Д. А. Особая значимость экологического фактора для устойчивого развития национальной экономики: концептуальный анализ // Национальные интересы, приоритеты и безопасность. 2014. № 4. С. 20–30.
29. Бегак М. В. НДТ: эффективно, доступно, продуктивно // ЭКО-бюллетень ИнЭкА. 2009. № 3(134). С. 16–19.
30. Ощепкова А. З., Фоминых С. П. Технологическое нормирование: как определить наилучшие доступные технологии // Экология производства. 2014. № 1. С. 46–52.
31. Приоритетные направления развития науки, технологий и техники РФ: утв. Президентом РФ 30.03.2002, № Пр-577.
32. Экологическая доктрина РФ: утв. Постановлением Правительства от 31.08.2002, № 1225-р.
33. Падалко О. В. От управления отходами – к управлению ресурсами: два пути // Проблемы региональной экологии. 2004. № 4. С. 50–58.
34. Дорохина Е. Ю., Харченко С. Г. Экономика замкнутых циклов: проблемы и пути развития // Экология и промышленность России. 2017. Т. 21. № 3. С. 50–55. https://doi.org/10.18412/1816-0395-2017-3-50-55
35. Дорохина Е. Ю., Харченко С. Г. Бизнес-модели экономики замкнутых циклов как механизм достижения устойчивого развития // Экология и промышленность России. 2017. Т. 21. № 7. С. 58–61. https://doi.org/10.18412/1816-0395-2017-7-58-61
36. Кныш В. А., Иванова Л. В. Циркулярная экономика: угроза для предприятий горнодобывающего сектора или драйвер их технологического развития? // Горный журнал. 2020. № 9. С. 33–41. https://doi.org/10.17580/gzh.2020.09.04
37. Towards a circular economy: A zero waste programme for Europe. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Brussels, 2.7.2014. COM(2014) 398 final. URZ. URL: http://ec.Europa.eu/transpareney/regdog/rep/1/2014/EN/1-2014-338-EN-1/pdf
38. Пахомова Н. В., Рихтер К. К., Ветрова М. А. Переход к циркулярной экономике и замкнутым цепям поставок как фактор устойчивого развития // Вестник Санкт-Петербургского университета. Экономика. 2017. Т. 33. Вып. 2. С. 244–268. https://doi.org/10.21638/11701/spbu05.2017.203
39. Ghisellini P., Cialani C., Ulgiati S. A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems // Journal of Cleaner Production. 2016. Vol. 114. P. 11–32. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.007
40. MacArthur E., Waughray D. Intelligent Assets: Unlocking the Circular Economy Potential. 2016. URL: https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/EllenMacArthurFoundation_Intelligent_Assets_088216.pdf

Статья поступила в редакцию 10 января 2024 года

УДК 331.104.22 http://doi.org/10.21440/2307-2091-2024-1-147-152

Трудовые коллективы: чем были вчера и чем стали сегодня

Сергей Михайлович АБРАМОВ*
Юрий Николаевич ЗЕЛЕНОВ
Наталья Владимировна ЗОТЕЕВА

Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия

Аннотация

Цель работы заключается в описании изменений, происходящих в трудовых коллективах в условиях трансформации от планово-директивной экономики к рыночным отношениям. Авторы ставят перед собой задачу проанализировать факторы, которые влияют на эффективность деятельности трудовых коллективов в процессе становления рыночных отношений. Авторы стремятся представить как сущее, так и должное состояние трудовых коллективов в современных условиях и выявить возможности и вызовы, с которыми сталкиваются эти коллективы.

Результаты работы. Предложенная в статье точка зрения на трансформацию трудовых коллективов, которая является очевидной, основана на анализе влияния перехода общества от планово-директивной экономики к рыночным отношениям. В данной статье указаны разновекторные факторы, которые объективно обусловили снижение эффективности деятельности трудовых коллективов в процессе становления рыночных отношений. В работе трудовые коллективы рассматриваются с точки зрения как сущего, так и должного. Представляется маловероятным возможность качественного скачка трудовых коллективов, персонал которых мог бы интенсивно использовать современные инновационные технологии. Трудовые коллективы в горнодобывающей отрасли сталкиваются с уникальными вызовами и особенностями. Одними из ключевых аспектов являются сложность и опасность работы в шахтах и на горных предприятиях. Работники в этой отрасли должны быть обладателями специальных навыков и знаний, а также строго соблюдать правила безопасности, чтобы избежать травм и несчастных случаев. В условиях колебаний цен на сырье и изменений в мировых рыночных условиях трудовые коллективы в горнодобывающей отрасли должны быть гибкими и адаптивными, чтобы эффективно реагировать на изменения спроса и обеспечивать устойчивость предприятий.

Выводы. Авторами сделаны выводы о необходимости развивать сложную управленческую культуру мышления руководителей, способных обеспечить существование трудовых коллективов в новых условиях, тем более что изменения в отечественной экономике неизбежно актуализируют задачу активизации новых подходов к анализу деятельности трудовых коллективов. Утверждается, что современные трудовые коллективы, персонал которых работает в режиме высокой неопределенности, быстрой смены задач, сочетая в своей деятельности элементы сотрудничества и конкуренции, больше не являются химерой прошлого, а удачно вписываются в конкурентный фрейм страны. Подводя итог, следует отметить, что к осмыслению трудовых коллективов, находящихся на границе между сущим и должным, не следует подходить с набором механических парадигмальных клише, упрощающих данный феномен. Здесь нужно двигаться к их осмыслению прежде всего с позиции непредвзятого критического рассмотрения.

***Ключевые слова*:** коллектив, трудовой коллектив, энтропия, экзистенциальный вакуум, фрустрация.

Трудно назвать другую проблему, которая не привлекала бы такого значительного внимания современных исследователей, как вопрос о трудовых коллективах, трансформация которых обусловлена сложными процессами, происходящими в экономической системе российского общества. Неослабевающий интерес к трудовым коллективам является свидетельством многоаспектности данного феномена. Ценность трансформации трудовых коллективов связана с эффективностью деятельности предприятия, ростом прибыли, выручки, рентабельности, в том числе с изменением социально-трудовых отношений. Так или иначе, именно трудовые коллективы, способствуя преодолению технологического развития страны, объективно обеспечивают переход экономики на новую ступень развития, связанную с преодолением инерции предыдущей траектории движения.

Вопросам изучения трудового коллектива в разных его интерпретациях посвящены работы большого числа советских и российских исследователей: Л. Я. Гинцбурга, А. И. Абалкина, А. Аганбегяна, А. И. Пригожина, О. И. Шкаратана, И. П. Плиева, что объясняется высокой степенью актуальности данного феномена.

Прежде всего целесообразно остановиться на содержании понятия «коллектив» и проследить его эволюцию.

✉abramowwwsm@mail.ru

Считается, что сам термин «коллектив» появляется в речевом дискурсе социальной психологии, чье внимание, безусловно, привлекли события Первой русской революции 1905–1907 гг. Критически важно отметить, что появление понятия «коллектив» имеет глубокие и более мощные корни, он не родился из идеальных побуждений или только ценностно-рациональных действий. Вероятно, его появление подпитывалось, стимулировалось ими.

Следует отметить, что одной из центральных характеристик коллектива 1920-х гг. являлась его нерасторжимая связь с коммунистическим строительством – великим социальным экспериментом, с новыми коллективными формами жизнеустройства общества.

Нетрудно заметить, что в Толковом словаре русского языка под ред. проф. Д. Н. Ушакова (1934) приводятся два значения данного понятия. Во-первых, это «группа людей, объединенных общими делами, общей работой». Во-вторых, это «групповое объединение в пределах какого-нибудь целого, ячейка» [1]. Однако данное понятие еще не нашло своего закрепления как институциональная форма интеракции советского общества и всех его сфер жизни.

В конце 1930-х гг. в СССР было канонизировано понятие коллектива, данное А. Макаренко. Макаренко небезосновательно определял его так: «Коллектив – это есть целеустремленный комплекс личностей, организованный, обладающий органами коллектива» [2]. Автор указывает на то, что данный феномен есть «… социальный живой организм, который потому и организм, что он имеет органы, что там есть полномочия, ответственность, соотношение частей, взаимозависимость…» [2]. Именно в таком коллективе складываются отношения «ответственной зависимости» [2], а функции между людьми «…связываются не просто дружбой, а связываются общей ответственностью в работе, общим участием в работе коллектива» [2]. Добавим: по Макаренко, коллектив должен быть организован в соответствии с социалистическим принципом советского общества на основе общих и личных целей.

Новое измерение и понимание коллектива было отражено в Толковом словаре русского языка С. И. Ожегова, где утверждается, что коллектив – это «группа лиц, объединенных общей работой, учебой, общими интересами» [3].

Авторитетный современный словарь русского литературного языка определяет коллектив как «совокупность людей, объединенных общими целями, общей деятельностью» [4]. Далее говорится, что это «объединение людей, связанных постоянной совместной работой и входящих в состав одной организации, учреждения, предприятия и т. п.» [4].

О. Хархордин утверждает, что «самое ныне распространенное значение слова "коллектив" – группа коллег, связанных постоянными трудовыми отношениями в данной организации – не помогает нам понять, о чем идет речь…» [5].

Очевидно одно – коллектив перестал быть новым явлением в социальной жизни общества, превратившись в элемент повседневной жизни социалистического общества, в котором индивиды «…работают по способности, получают вознаграждение соответственно вносимой им доле труда» [6]. Как бы то ни было, но с данной точкой зрения автора, подчеркивающей явный аспект трудовых коллективов, трудно не согласиться.

Несмотря на то, что авторы (исследователи) по-разному трактуют сущность трудовых коллективов, тем не менее они все сходятся в том, что с данным феноменом невозможно не считаться. Ни одно из приведенных понятий трудового коллектива не представляется лишним, все они в той или иной степени обеспечивают многоосмысленное понимание проблемы.

Важно указать, что только к концу советского периода трудовые коллективы были оформлены юридически – 1 августа 1983 г. вступил в силу «Закон о трудовых коллективах и повышении их роли в управлении предприятиями, учреждениями, организациями», в преамбуле которого давалось определение данного понятия. 30 июня 1987 г. был принят Закон о государственном предприятии (объединении), провозгласивший выборность руководителей всех звеньев на предприятии как способ замещения должностей. Кроме того, закон предусматривал создание советов трудовых коллективов, реальные полномочия которых будут ограниченными, ибо следует принять во внимание тот факт, что совет трудового коллектива мог принимать решения, формулировать предложения, а фактически их реализация оставалась в руках администрации, которая являлась юридическим лицом, а значит, имела право заключать хозяйственные договоры, осуществлять оплату труда, заниматься организацией производства и труда персонала.

В советском обществе трудовые коллективы выступали в качестве единого формального сообщества людей, связанного коллективной ответственностью и общим производственным планом. Подчеркнем: деятельность советских трудовых коллективов не исчерпывалась только совместной производственной деятельностью. Она включала общественную деятельность, например, собрания трудового коллектива; личные взаимоотношения, общее проведение досуга. В трудовых коллективах прозрачность повседневной жизни, текущей деятельности и взаимный перекрестный контроль делали «… человека близким и понятным коллективу – "своим" в прямом смысле этого слова…» [5]. Более того, характерной особенностью советских трудовых коллективов было то, что в них действовал «…глубинный закон нивелирования индивида и прикрепления его к коллективу» [6], как подчеркивал А. А. Зиновьев. К сказанному можно было бы добавить: трудовой коллектив поглощал личность работника, ставил его на службу государству. Кроме того, трудовой коллектив решительно отторгал самостоятельность мышления индивида («будь как все»), пренебрегал его частными интересами, личными убеждениями и правами, а личность работника теряла свою индивидуальность, свободу распоряжаться собой. На этом фоне положительной чертой трудового коллектива выступал накапливаемый капитал сотрудничества как уникальный его ресурс, встроенный в архитектуру развития коллектива. Этими специфическими принципами, которые не могли не повлиять на производительность труда, и была обусловлена деятельность человека. Здесь важно избежать редукции трудового коллектива к нивелированию индивида и его личностных свойств и качеств. С нашей стороны было бы упрощением

придавать чрезмерное значение подобным негативным проявлениям трудового коллектива. При этом нельзя не указать на очевидный факт, имеющий важное значение: двойственная природа трудовых коллективов, построенных по принципу коллективизма, сотрудничества и пропитанных чувством своей миссии, с одной стороны, и отсутствия или отрицания свободы индивида, с другой стороны, удерживала экономику советского государства в состоянии относительной стабильности. Обычно именно этот аспект и недооценивают.

Особо следует отметить, что переход к рыночной экономике необратимо привел к радикальной трансформации трудовых коллективов, что нашло отражение в работах известных отечественных исследователей, таких как А. Г. Здравомыслов и В. А. Ядов. Авторы указывают, что переход от плановой экономики к рыночной необратимо сопровождался изменением социально-трудовых отношений в трудовом коллективе, которые «… стали более формализованными и меркантильными». И далее: «Бывшие трудовые коллективы превратились в сообщества российских работников наемного труда и представителей работодателя». С данной констатацией известных исследователей трудно не согласиться, но думаем, что она нуждается в дополнении, в частности, трансформация трудовых коллективов в условиях перехода к рыночным отношениям была неизбежна; она не могла не повлечь за собой снижение их эффективности. Уместно подчеркнуть: это не была качественная трансформация трудовых коллективов, персонал которых мог бы интенсивно использовать современные инновационные технологии. Прежде всего, их трансформация говорила об исчерпанности советского трудового коллектива, ибо его конструкция не выдержала натиска воздействий со стороны капиталистической формации. Был разрушен сам принцип его существования – совместность, что, возможно, не бесспорно, но важно для понимания данного понятия. В итоге трудовые коллективы, выйдя из состояния равновесия, оказались в разобранном и разбалансированном состоянии, они больше не были объединены сильным чувством своей миссии, высоким уровнем приверженности, вовлеченности, лояльности и преданности организации, глубоким чувством совместной работы. Иными словами, трудовые коллективы больше не являлись тем, чем были в условиях планово-директивной экономики. Более того, они оказались отстранены от реального участия в отношениях собственности на средства производства, продолжая номинально участвовать в ней. Подчеркнем: трудовые коллективы изменились несущественно, ибо их работники продолжали и продолжают трудиться в соответствии с «социалистическими» сдельными и повременными оплатами труда. Важно указать, что при переходе страны к рыночной экономике «… характер труда российских работников остался неизменным, по своей сущности – это отчужденный труд» [7].

Российское общество, вступившее в переходный период, было охвачено масштабной энергией энтропии – энергией распада и хаоса, высокой степенью неопределенности, которая привела к распаду социальных связей. Как следствие в трудовых коллективах появился страх безработицы, нарастало состояние растерянности как проявление экзистенциального вакуума (кризиса), что сопровождалось потерей смысла и цели жизни, искажением системы ценностей индивида. Итогом стало появление фрустрация как реакции индивида перед неизвестностью, подавленным эмоциональным состоянием в результате крушения планов, замыслов и желаний, шло постепенное разрушение системы отношений друг к другу и к делу, которая была замкнута на людей, что нашло выражение в дурной состязательности.

К числу разновекторных факторов, приведших к снижению эффективности трудового коллектива, можно отнести напряженную психологическую атмосферу, обусловленную нарушением принципа социальной справедливости; высокую степень самостоятельности и автономности персонала; отсутствие коллективных навыков, необходимых для выполнения заданий; обезличивание и деиндивидуализацию личности работника, особенно в больших трудовых коллективах; образовательное неравенство персонала, что связано со снижением требований к профессиональной квалификации рабочей силы; рост числа конфликтов, вызванных ненормативным распределением нагрузки, отсутствием должностных инструкций и низкой культурой общения, в том числе «… быстрые, постоянные перемены на рынке труда и в обществе, смена ценностных ориентаций и форм поведения руководителей» [8]. Низкая квалификация руководящего состава, его управленческих навыков, разобщенность персонала не могли не повлиять на совместную деятельность работников, в том числе господство принципа «разделяй и властвуй». К числу других факторов можно отнести запреты в корпоративной культуре организации, несоответствие возможностей отдельного работника и выполняемой им работы; неэффективная организация труда персонала. Здесь важно отметить, что факторы, приводящие к снижению эффективности деятельности трудовых коллективов, остаются относительно постоянными.

С точки зрения сущего, современные трудовые коллективы, которые объективно движутся в сторону большей своей сложности, превратились в сообщества атомизированных и индивидуализированных свободных индивидов, скрепленных административными рамками, регламентами и правилами, в рамках которых они (индивиды) приобретают реальное значение посредством реализации своих сущностных качеств и свойств, мотивированных, прежде всего, результатами своего труда, выраженных в форме материального поощрения. В данном типе трудового коллектива жизнь людей практически исчерпывается совместной производственной деятельностью, а взаимный горизонтальный контроль и близость больше не являются регуляторами их жизни, но при этом ужесточается вертикальный контроль за персоналом коллектива, конкурентная среда организации разъединяет членов организации, который уже не является одной семьей. В таком типе трудового коллектива на место инертного работника приходит новый тип, но уже лично свободный, обладающий личной автономией, но в большинстве случаев лишенный средств производства, что отражено в табл. 1. С точки зрения должного, трудовые коллективы постепенно трансформируются во множественную сотовую систему, где каждая сота наполняется определенным

Таблица 1. Особенности трудовых коллективов
Table 1. Features of work collectives

Советские трудовые коллективы эпохи плановой экономики	Трудовые коллективы эпохи рыночных отношений
Чувство ответственности за общее дело	Ответственность за собственную работу
Работники и руководители – партнеры	Администрация – эксплуататоры (неограниченная власть работодателя)
Интеракции преимущественно горизонтальные	Вертикально организованные
Принцип: «один за всех, все за одного», взаимовыручка	Принцип: «каждый сам за себя», преобладают инстинкты выживания
Горизонтальный взаимный надзор как повседневная практика	Вертикальный надзор со стороны администрации
Неформализованные социально-трудовые отношения	Формализованные социально-трудовые отношения
Вмешательство коллектива в личную жизнь работника	Невмешательство в личную жизнь работника
Коллективизм (ориентация на «Мы») как особый тип поведения	Индивидуализм (ориентация на «Я»)
Единство интересов работников и работодателей	Противоречие интересов работника и работодателя.
Социальное партнерство	Отказ от принципа социального партнерства
Коллективный эгоизм	Конкурентный эгоизм каждого
Сотрудничество как нематериальное преимущество коллектива	Конкуренция и сотрудничество персонала как норма отношений в коллективе

трудовым содержанием, в которой индивиды не только взаимодействуют, но и конкурируют друг с другом, чья деятельность имеет преобразующий характер, адекватный задачам модернизации страны, особенно в условиях дефицита трудовых ресурсов. Данному типу трудового коллектива предстоит вернуть персоналу чувство коллективности, но уже на более высоком интеллектуальном уровне.

Как следствие, текущая социально-экономическая ситуация потребовала иной интерпретации данного понятия. Приведем несколько подходов к определению трудовых коллективов. Так, например, Х. А. Хабибуллин справедливо делает акцент на том, что «трудовой коллектив – это общественно-коллективная форма развития и функционирования производительных сил» [9]. Одновременно авторы рассматривают сущность трудовых коллективов во взаимосвязи с кооперацией труда и трудовым потенциалом. Со своей стороны подчеркнем, что трудовой коллектив – это сложная система, в которой все взаимосвязано. Осмелимся утверждать, что отсутствие стратегии развития трудового коллектива в постсоветскую эпоху сковало развитие экономики государства.

В энциклопедии «Управление персоналом» говорится о том, «что трудовой коллектив – все граждане, участвующие своим трудом в деятельности предприятия на основе трудового договора». Представляется очевидным подчеркнуть, что участие граждан в трудовой деятельности обусловлено как общими интересами, так и единством – управляющих (менеджеров) и управляемых (рядовых сотрудников).

По мнению Л. Ф. Голубевой, «трудовой коллектив – это не сумма индивидов, это единый организм, в котором действуют социально-психологические явления …» [10]. В данном понятии, которое лишено оригинальности, но не здравого смысла, безусловно, преобладает односторонний подход к рассмотрению трудовых коллективов. Автор фактически делает упор на психологические факторы и явления, оставляя в стороне такую важную составляющую трудового коллектива, как совместная трудовая деятельность, которая принизывает все аспекты трудового коллектива, и другие важные качества персонала, а именно обучаемость, коммуникации, компетенции, опыт работников, что позволяет сегодня работнику адаптироваться к новым трудовым функциям.

На наш взгляд, более убедительным является следующее определение трудового коллектива, предложенное к рассмотрению отечественным исследователем Л. В. Чегаевой. По ее мнению, «трудовой коллектив – это сложная экономическая система, выраженная в добровольном трудовом объединении, сформированном на основе социально-трудовых отношений, обладающая определенными характеристиками и выполняющая важные социальные и экономические функции, осуществляющая деятельность на принципах единства социально-значимых интересов и целей, позволяющих достигать желаемого (заданного) уровня развития коллектива с учетом индивидуальных характеристик каждой личности, включенной в данный коллектив» [11]. Несмотря на некоторую перегруженность понятия, автору в целом удалось показать сложность и многоаспектность данного феномена.

«Пестрота» определений трудового коллектива, с одной стороны, придает данному понятию высокую степень неустойчивости, а с другой стороны, делает его притягательным как в теоретическом, так и в практическом смысле в силу того, что указанный феномен может вмещать в себя большое количество смыслов несмотря на то, что принципиально нового в понятии трудового коллектива нет. Более того, разнородность точек зрения на понятие трудового коллектива затрудняет оценку текущего положения дел в области трансформации данного феномена.

Подводя итог, следует отметить, что к осмыслению трудовых коллективов, находящихся на границе между сущим и должным, не следует подходить с набором механических парадигмальных клише, упрощающих дан-

ный феномен. Здесь нужно двигаться к их осмыслению, прежде всего, с позиции непредвзятого критического рассмотрения. Не подлежит сомнению тот факт, что сегодня крайне необходимо формировать и создавать работающие трудовые коллективы, которые способны гибко адаптироваться и – главное – видоизменяться в течение времени, работать в режиме высокой неопределенности, быстрой смены условий задач, действуя в тех пределах, которые обеспечивают конкурентоспособность организации. Вместе с тем необходимо развивать сложную управленческую культуру мышления руководителей, способных обеспечить существование трудовых коллективов в новых условиях, тем более что изменения в отечественной экономике неизбежно актуализируют задачу активизации новых подходов к анализу деятельности трудовых коллективов. Следует указать, что современные трудовые коллективы, персонал которых сочетает в своей деятельности элементы сотрудничества и конкуренции, больше не являются химерой прошлого, а удачно вписываются в конкурентный фрейм страны.

Искать ответы в прошлом не получается, ибо в новых экономических условиях прежние решения, технологии управления трудовыми коллективами уже не работают.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ушаков Д. Н. Толковый словарь русского языка. 1934–1940. В 4 т. Т. 1. М.: ОГИЗ-Гос. изд. «Советская энциклопедия», 1935. 1562 с.
2. Макаренко А. Проблемы школьного советского воспитания: соч. в 7 т. Т. 5. М.: Изд-во АПН РСФСР, 1958. 558 с.
3. Ожегов С. И., Шведова Н. А. Толковый словарь русского языка: 80 000 слов и фразеологических выражений. М.: Азъ, 1996. 928 с.
4. Словарь современного русского литературного языка. В 17 т. Т. 5. М.; Л.: Наука, 1956.1916 с.
5. Хархордин О. В. Обличать и лицемерить: генеалогия российской личности. СПб: Изд-во Европейского университета в Санкт-Петербурге, 2016. 508 с.
6. Зиновьев А. А. Коммунизм как реальность. Кризис коммунизма. М.: Центрполиграф, 1994. 495 с.
7. Белкин В. Н., Белкина Н. А., Антонова О. А. Модернизация социально-трудовых отношений на российских предприятиях // Журнал экономической теории. 2019. Т. 16. № 3. С. 444–453. https://doi.org/10.31063/2073-6517/2019.16-3.12
8. Сулягина Ю. О., Лебедева Е. А. Причины социально-трудовых конфликтов // Инновации. Наука. Образование. 2021. № 28. С. 1482–1488.
9. Хабибуллин Х. А. Трудовой коллектив и трансформация его деятельности в условиях становления рыночных отношений: автореф. дис. … канд. экон. наук. СПб, 2001. 25 с.
10. Голубева Л. Ф. Социально-психологические основы управления трудовым коллективом // Вестник Тамбовского университета. Сер.: Гуманитарные науки. Прикладные аспекты экономики и управления народным хозяйством. 2015. № 2 (142). С. 66–73.
11. Чегаева Л. В. Ретроспективная трансформация понятия «трудовой коллектив» // Вестник Сибирского института бизнеса и информационных технологий. 2020. № 3 (35). С. 111–116.

Статья поступила в редакцию 26 декабря 2023 года

UDC 331.104.22

http://doi.org/10.21440/2307-2091-2024-1-147-152

Labor collectives: what were you yesterday and what have you become today

Sergey Mikhailovich ABRAMOV*
Yuriy Nikolaevich ZELENOV
Natal'ya Vladimirovna ZOTEEVA

Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia

Abstract

The purpose of the work is to describe the changes occurring in work collectives in the conditions of transformation from a planned-directive economy to market relations. The authors set themselves the task of analyzing the factors that influence the efficiency of work collectives in the process of developing market relations. The authors strive to present both the current and proper state of work collectives in modern conditions and to identify the opportunities and challenges that these collectives face.

Results. The point of view on the transformation of labor collectives proposed in the article, which is obvious, is based on an analysis of the impact of the transition of society from a planned-directive economy to market relations. This article identifies multi-vector factors that objectively caused a decrease in the efficiency of work collectives in the process of establishing market relations. In this research, work collectives are considered from the point of view of the way they are and the way they are supposed to be. It seems unlikely that there will be a qualitative leap in labor collectives whose personnel could intensively use modern innovative technologies. Workforces in the mining industry face unique challenges and characteristics. One of the key aspects is the complexity and danger of working in mines and mining enterprises. Workers in this industry must have specialized skills and knowledge and strictly adhere to safety regulations to avoid injuries and accidents. With fluctuating commodity prices and changes in global market conditions, mining teams must be flexible and adaptive to effectively respond to changes in demand and ensure enterprise sustainability.

Conclusions. The authors made conclusions about the need to develop a complex management culture of thinking among managers capable of ensuring the existence of work collectives in new conditions, especially since changes in the domestic economy inevitably actualize the task of intensifying new approaches to analyzing the activities of work collectives. It is argued that modern labor collectives, whose personnel work in a regime of high uncertainty, rapid change of tasks, combining elements of cooperation and competition in their activities, are no longer a chimera of the past, but successfully fit into the competitive frame of the country. To summarize, it's worth mentioning that the understanding of work collectives located on the border between what they are and what they are supposed to be should not be approached with a set of mechanical paradigmatic clichés that simplify this phenomenon. Here we need to move towards understanding them, first of all, from the position of unbiased critical consideration.

***Keywords*:** collective, labor collective, entropy, existential vacuum, frustration.

REFERENCES

1. Ushakov D. N. 1935, Explanatory dictionary of the Russian language, vol. 1. Moscow, 1562 p. (*In Russ.*)
2. Makarenko A. 1958, Problems of school Soviet education, vol. 5. Moscow, 558 p. (*In Russ.*)
3. Ozhegov S. I., Shvedova N. A. 1996, Explanatory dictionary of the Russian language. Moscow, 928 p. (*In Russ.*)
4. 1956, Dictionary of modern Russian literary language, vol. 5. Moscow, 1916 p. (*In Russ.*)
5. Kharkhordin O. V. 2016, To expose and be hypocritical: the genealogy of the Russian personality. Saint Petersburg, 508 p. (*In Russ.*)
6. Zinoviev A. A. 1994, Communism as a reality. Crisis of communism. Moscow, 495 p. (*In Russ.*)
7. Belkin V. N., Belkina N. A., Antonova O. A. 2019, Modernization of social and labor relations at Russian enterprises. *Zhurnal ekonomicheskoy teorii* [Journal of Economic Theory], vol. 16, no. 3, pp. 444–453. (*In Russ.*) https://doi.org/10.31063/2073-6517/2019.16-3.12
8. Sulyagina Yu. O., Lebedeva E. A. 2021, Causes of social and labor conflicts. *Innovatsii. Nauka. Obrazovaniye* [Innovation. Science. Education], no. 28, pp. 1482–1488. (*In Russ.*)
9. Khabibullin H. A. 2001, Labor collective and transformation of its activities in the conditions of the formation of market relations, PhD thesis. Saint Petersburg, 25 p. (*In Russ.*)
10. Golubeva L. F. 2015, Social and psychological foundations of workforce management. *Vestnik Tambovskogo universiteta* [Bulletin of Tambov University], no. 2 (142), pp. 66–73. (*In Russ.*)
11. Chegaeva L. V. 2020, Retrospective transformation of the concept of "work collective". *Vestnik Sibirskogo instituta biznesa i informatsionnykh tekhnologiy* [Bulletin of the Siberian Institute of Business and Information Technology], no. 3 (35), pp. 111–116. (*In Russ.*)

The article was received on December 26, 2023

✉abramowwwsm@mail.ru

УДК 622.324.5:005.21 http://doi.org/10.21440/2307-2091-2024-1-153-163

Модель взаимодействия участников реализации проектов освоения ресурсов угольного метана

Петр Николаевич ПАРМУЗИН*

Ухтинский государственный технический университет, Ухта, Республика Коми, Россия

Аннотация

Актуальность. Устойчивое развитие отрасли по добыче и использованию угольного метана во многом зависит от того, насколько согласованы интересы между государством и компаниями-участниками проектов. Поэтому формирование модели взаимодействия участников реализации проектов освоения ресурсов угольного метана является актуальной экономической задачей.

Целью исследования является постановка и решение научной проблемы, связанной с формированием модели взаимодействия участников реализации проектов освоения ресурсов угольного метана.

Методы исследования. В работе использованы: логический подход к определению базовых понятий теории и практики стратегического управления; системный подход к управлению; принципы стратегического, ситуационного и динамического анализа; инструментарий экономико-математического моделирования.

Результаты. Проведен анализ вариантов разработки газосодержащих угольных пластов. Сформирован комплекс методов определения прямых и косвенных эффектов от извлечения и использования угольного метана. На основе проведенного анализа и сформированных методов разработана модель взаимодействия участников реализации проектов освоения ресурсов угольного метана с учетом баланса их интересов. Предлагаемая модель включает: схему баланса интересов государства и компаний-участников; схемы распределения затрат и результатов между государством и компаниями-участниками при различных вариантах освоения ресурсов угольного метана; предельные значения экономических показателей, необходимых для реализации проектов освоения ресурсов угольного метана.

Заключение. Предложенную модель можно использовать при оценке эффективности инвестиций и при разработке стратегических планов освоения ресурсов угольного метана. Модель позволяет рационально обосновать распределение затрат и результатов, а также определить условия достижения экономической эффективности для всех участников проектов.

***Ключевые слова*:** угольный метан, экономический эффект, экономическое моделирование, баланс интересов, государственное стимулирование, стратегическое планирование.

Введение

Энергетическая стратегия России до 2035 г. устанавливает разработку нетрадиционных запасов в нефтяном и газовом секторе в качестве одного из приоритетных направлений научно-технического развития[1]. При этом следует отметить, что в России на сегодняшний день ресурсы метана угольных пластов (МУП) превышают ресурсы сланцевого газа и газа плотных песчаников вместе взятых, что определяет особую роль МУП в будущем развитии отечественной газодобычи [1–3].

Устойчивое развитие отрасли по добыче и использованию угольного метана во многом зависит от того, насколько согласованы интересы между государством и компаниями-участниками проектов [4–6]. Интересы компаний-участников выражаются прямыми и косвенными экономическими эффектами. Государство заинтересовано в вовлечении в хозяйственный оборот дополнительных ресурсов газа, снижении аварийности и травматизма в угольных шахтах; увеличении занятости в районе работ; улучшении экологической ситуации в результате снижения эмиссии метана в атмосферу; налоговых поступлениях от деятельности по добыче и переработке газа и угля. Разработанная модель позволит компаниям и государству принимать обоснованные стратегические решения о разработке ресурсов угольного метана.

Теоретические основы исследования

Теоретической основой для формирования модели явились методы определения экономических эффектов от разработки газосодержащих угольных пластов. В настоящее время у специалистов и ученых существуют разные подходы к определению одних и тех же экономических эффектов от разработки ресурсов угольного метана, а некоторые прямые и косвенные результаты ими не учитываются совсем [7–12]. В связи с этим в работе сформирован комплекс методов определения прямых и косвенных экономических эффектов, в котором наиболее полно учтены все результаты освоения ресурсов угольного метана (табл. 1).

✉ptr12@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-8868-830X

* Об утверждении энергетической стратегии РФ на период до 2035 г.: распоряжение Правительства РФ от 9 июня 2020 г. № 1523-р.

Таблица 1. Экономические эффекты в проектах освоения ресурсов угольного метана
Table 1. Economic effects in coal methane resource development projects

Виды экономических эффектов	Методика расчета экономических эффектов
	Прямые эффекты
Экономический эффект от использования извлекаемого метана	Экономический эффект от использования извлекаемого метана $Э_и$ рассчитывается по формуле: $$Э_и = \sum_{i=1}^{n} Э_i = \sum_{i=1}^{n} \frac{Q_i Ц_i}{q_i},$$ где $Э_i$ – экономический эффект от использования метана по *i*-му направлению, руб.; Q_i – объем МВС, перерабатываемой по *i*-му направлению, м^3; *i* – направление использования извлеченного метана; q_i – удельный расход МВС на производство единицы продукции *i*-го направления, м^3/ед. продукции (1000 м^3 метана, 1 кВт · ч электроэнергии, 1 Гкал · ч тепла, 1 т сажи и т. д.); $Ц_i$ – цена реализации метана и (или) продуктов, полученных при его переработке, (руб./1000 м^3, руб./1 кВт · ч электроэнергии, руб./1 Гкал · ч тепла, руб./1 т сажи)
Экономический эффект от снижения выбросов метана в атмосферу	Экономический эффект от снижения выбросов метана в атмосферу $Э_в$ представляет собой сокращение затрат угледобывающего предприятия на платежи за выбросы метана в атмосферу. При определении платежа необходимо сравнить величину предотвращенного выброса *Q*, переведенную в тонны (масса 1 м^3 метана при температуре 293 К равна 6,679 · 10^{-4} т) с установленными нормативами. К предотвращенному выбросу относятся только объемы используемого метана. Если $Q \le Н_{ПДВ}$, то $Э_в = Q \cdot З_{ПДВ} \cdot k_{п1} \cdot k_д$. Если $Q > Н_{ПДВ}$, то $Э_в = (Н_{ПДВ} \cdot З_{ПДВ} \cdot k_{п1} + (Q - Н_{ПДВ}) \cdot k_{п1} \cdot k_{п2}) \cdot k_д$, где $З_{ПДВ}$ – базовый норматив платы за выброс в размерах, не превышающих предельно допустимые нормативы выбросов, руб./т; $Н_{ПДВ}$ – предельно допустимый выброс, т; $k_{п1}$ – повышающий коэффициент за выброс в пределах норматива, доли ед.; $k_{п2}$ – повышающий коэффициент за выброс, превышающий норматив, доли ед.; $k_д$ – дополнительный коэффициент для особых территорий и объектов, доли ед.
Экономический эффект от улучшения использования фронта горных работ в угольных шахтах, связанного со снижением влияния «газового фактора»	$$Э_ш = Э_{оч} + Э_{подг} + Э_{вент}.$$ Экономический эффект от повышения нагрузки на очистной забой $Э_{оч}$ рассчитывается по формуле: $$Э_{оч} = ((t_{п.д} - t_{п.п}) \cdot П_к \cdot N) \cdot (Ц_{1\,т\,уг} - C_{1\,т\,уг} \cdot y_{у\text{-}пер}),$$ где $t_{п.д}$, $t_{п.п}$ – время простоев очистных комбайнов, работающих в зоне дегазации, из-за воздействия «газового фактора» до и после проведения дегазации, мин/сут; $П_к$ – производительность очистных комбайнов, т/мин; *N* – число рабочих дней в году, сут; $Ц_{1т\,уг}$ – цена 1 т угля, руб./т; $C_{1т\,уг}$ – себестоимость продажи 1 т угля, руб./т; $y_{у\text{-}пер}$ – удельный вес условно-переменных затрат в себестоимости продажи 1 т угля, доли ед. Экономический эффект от повышения темпа проведения подготовительных выработок в шахтах $Э_{подг}$ рассчитывается по формуле: $Э_{подг} = (v_п - v_д) \cdot N \cdot C_{1\,м} \cdot y_{у\text{-}пост}$, где $v_п$, $v_д$ – скорость проведения подготовительных выработок в зоне дегазации соответственно после и до ее внедрения, м/сут; $C_{1\,м}$ – себестоимость проходки 1 м подготовительных выработок после проведения дегазации, руб./м; $y_{у\text{-}пост}$ – удельный вес условно-постоянных затрат в себестоимость проходки 1 м подготовительных выработок, доли ед. Эффект от сокращения затрат на работу системы вентиляции $Э_{вент}$: $$Э_{вент} = \gamma_{у\text{-}пост} \cdot C_{1\,м.\text{-}ч} \cdot t_{в.д},$$ где $\gamma_{у\text{-}пост}$ – доля условно-постоянных затрат, уменьшение которых происходит в результате сокращения проходящего через вентилятор количества воздуха, доли ед.; $C_{1\,м.\text{-}ч}$ – стоимость одного машино-часа работы вентиляционной установки, руб./ч; $t_{в.д}$ – время воздействия работ по дегазации на сокращение расхода воздуха вентиляционной системой, ч
Экономический эффект от снижения аварийности, связанной со взрывами метана	$$Э_{ав} = (У_{пр} + У_{б.т} + Н_п) \cdot K_в,$$ где $У_{пр}$ – прямые потери, связанные с разрушением промышленных объектов, руб.; $У_{б.т}$ – сумма потерь в связи с травматизмом шахтеров, руб.; $Н_п$ – потери, связанные с недополучением продукции в связи с аварией, руб.; $K_в$ – коэффициент, учитывающий вероятность предотвращения аварий, связанных со взрывами метановоздушной смеси в результате внедрения новой системы дегазации, доли ед.; $$У_{пр} = C_{и.д} - C_{и.п},$$ где $C_{и.д}$, $C_{и.п}$ – стоимость имущества шахты до и после аварии, руб.; $$У_{б.т} = У1 + У2 + У3 + У4,$$ где У1 – возмещение бюджету государственного социального страхования расходов на выплату пособий по временной нетрудоспособности, руб.; У2 – возмещение органам социального обеспечения сумм пенсий (или части пенсии) инвалидам труда, руб.; У3 – выплата пособий нетрудоспособным членам семьи в случае смерти работника от травмы, связанной с производством (за потерю кормильца), руб.; У4 – затраты предприятия на профессиональную подготовку и переподготовку работающих, принимаемых на работу взамен выбывших в связи с травмой, руб.; $$Н_п = Д \cdot В_{ср/сут} (Ц_{1т\,уг} - C_{1т\,уг} \cdot y_{у\text{-}пер}),$$ где Д – число потерянных вследствие аварии дней, сут; $В_{ср/сут}$ – среднесуточная выработка аварийного участка до момента аварии, т

Экономический эффект от сокращения затрат на ранее проводимую дегазацию

$$Э_{р.\,д} = Q_{уг} \cdot C_{1\,т\,уг} \cdot y_{р.\,д} \cdot y_{с.\,з},$$

где $Q_{уг}$ – годовая добыча угля в зоне дегазации, т; $y_{р.\,д.}$ – доля затрат на ранее проводимую дегазацию в себестоимости добычи 1 т угля, доли ед.; $y_{с.\,з}$ – доля, на которую можно сократить затраты на ранее проводимые методы дегазации без снижения общей эффективности дегазации, доли ед. Возникновение этого экономического эффекта возможно, только если внедряемая новая система дегазации полностью или частично заменяет ранее проводимую дегазацию

Косвенные эффекты

Экономический эффект, связанный с улучшением экологической ситуации

Экономический эффект $Э_{эк}$, связанный с улучшением экологической ситуации, выражается следующим образом:

$$Э_{эк} = K_{в.муп.}((Ч_{у} - Ч_{ср}) \cdot В + (Ч_{у} - Ч_{ср}) \cdot C + (И_{у} - И_{ср}) \cdot C + (И_{у} - И_{ср}) \cdot П + (M_{у} - M_{ср}) \cdot C + (Т_{у} - Т_{ср}) \cdot Пт),$$

где $K_{в.муп.}$ – коэффициент, учитывающий удельный вес воздействия выбросов МУП в общей сумме факторов, влияющих на повышенный уровень заболеваемости и травматизма в угольных регионах; $Ч_{у}$, $Ч_{ср}$ – число дней временной нетрудоспособности в угольном регионе и в среднем по стране, сут; $И_{у}$, $И_{ср}$ – первичный выход на инвалидность в угольном регионе и в среднем по стране, чел.; $M_{у}$, $M_{ср}$ – общая смертность населения в трудоспособном возрасте в угольном регионе и в среднем по стране, чел.; $Т_{у}$, $Т_{ср}$ – производственный травматизм со смертельным исходом в угольном регионе и в среднем по стране, чел.; В – средства, расходуемые государством на выплаты по временной нетрудоспособности в среднем за один день, руб./сут; C – стоимость недополученного продукта за один день в связи с временной нетрудоспособностью, инвалидностью или смертью, руб./сут; П – пенсия по инвалидности, руб.; Пт – пенсия в связи с потерей кормильца из-за производственных травм, руб.
К этой оценке можно добавить средства государства, затрачиваемые в системе здравоохранения на лечение, диагностику и уход за больными

Экономический эффект от повышения уровня занятости населения в угольных регионах

В результате реализации проектов разработки газосодержащих угольных пластов создается значительное число новых рабочих мест: в добыче МУП; в переработке МУП; в угледобыче, если проект дегазации приводит к повышению нагрузки на очистной забой и росту добычи угля; в смежных отраслях.
Экономический эффект, связанный с увеличением занятости населения $Э_{з.\,н}$, может быть выражен следующей формулой:

$$Э_{з.\,н} = (\Delta K_{доб} + \Delta K_{пер} + \Delta K_{уг} + \Delta K_{см})\,З_{1\,р.\,м},$$

где $\Delta K_{доб}$ – дополнительное количество рабочих мест, создаваемых в добыче МУП, чел.; $\Delta K_{пер}$ – дополнительное количество рабочих мест, создаваемых в переработке МУП, чел.; $\Delta K_{уг}$ – дополнительное количество рабочих мест, создаваемых в угледобыче, чел.; $\Delta K_{см}$ – дополнительное количество рабочих мест, создаваемых в смежных отраслях, чел.; $З_{1\,р.\,м}$ – затраты государства на создание одного рабочего места в рамках программ по повышению занятости или размер пособия по безработице на одного человека, предусмотренный в рамках законодательства, руб.

Экономический эффект от роста производства в сопутствующих отраслях за счет мультипликативного эффекта

Еще одним экономическим эффектом от разработки газосодержащих угольных пластов является рост производства в сопутствующих отраслях за счет мультипликативного эффекта $Э_{м}$, суть которого заключается в том, что увеличение затрат в добыче и переработке МУП ведет к росту производства в целом по экономике;

$$Э_{м} = Э_{МУП} \cdot K_{мул},$$

где $Э_{МУП}$ – прямой экономический эффект, полученный при добыче и переработке МУП, руб.; $K_{мул}$ – коэффициент мультипликации, показывающий, во сколько раз изменятся показатели развития экономики при росте производства в добыче и переработке МУП, доли ед.
По данным А. А. Широва и А. А. Янтовского, мультипликативный эффект в добыче природного газа в России без учета импорта составляет 1,31 [13]

Экономический эффект на предприятиях и в экономике страны от повышения инновационного потенциала

Экономический эффект на предприятиях и в экономике страны от повышения инновационного потенциала $Э_{нт.\,п}$ можно выразить формулой:

$$Э_{нт.\,п} = Э_{к} + Э_{тт} + Э_{нт.\,и} + Э_{о.\,уп},$$

где $Э_{к}$ – экономический эффект от повышения кадрового потенциала, руб.; $Э_{тт}$ – экономический эффект от внедрения новых техники, технологий, материалов, руб.; $Э_{нт.\,и}$ – экономический эффект от внедрения новой научно-технической информации, руб.; $Э_{о.\,уп}$ – экономический эффект от внедрения новых методов организации и управления производством, руб.

Экономический эффект от улучшения имиджа предприятий и государства

Экономический эффект от улучшения имиджа предприятий, участвующих в проектах освоения МУП, может быть оценен следующим образом:

$$Э_{им} = Э_{потр} + Э_{парт} + Э_{гос} + Э_{перс},$$

где $Э_{потр}$ – экономический эффект от повышения имиджа предприятия у потребителей и общества в целом (рост объемов продаж и прибыли и др.), руб.; $Э_{парт}$ – экономический эффект от повышения имиджа предприятия у деловых партнеров (заключение новых долгосрочных контрактов, получение льготных кредитов и др.), руб.; $Э_{гос}$ – экономический эффект от повышения имиджа предприятия у государства (получение налоговых льгот, субсидий и др.), руб.; $Э_{перс}$ – экономический эффект от повышения имиджа предприятия у персонала предприятия (повышение производительности труда в результате увеличения сплоченности коллектива), руб.
Также можно отметить, что успешные проекты освоения ресурсов МУП с учетом всех социальных и экологических эффектов ведут к улучшению имиджа угольных регионов и страны в целом

Экономический эффект от полного или частичного замещения поставляемого в угольный регион природного газа метаном угольных пластов

Эффект от увеличения прибыли (или убытков) газодобывающей компании в результате полного или частичного замещения поставляемого в регион природного газа метаном угольных пластов;

$$Э_{з.г} = \sum_{i=1}^{n}((Т_{дi} + Т_{тi} \cdot l_i/100) \cdot Q_{зi}) - Q_з \cdot Ц_{ФСТ},$$

где $Э_{з.г}$ – изменение денежного потока газодобывающего предприятия от реализации газа, замещаемого метаном угольных пластов, руб.; $Т_{дi}$ – внутренние расчетные тарифы на газ (*i*-е месторождение), руб./1000 м³; $Т_{тi}$ – внутренние расчетные тарифы на транспортировку газа (на поставку с *i*-го месторождения), руб./1000 м³ на 100 км; l_i – транспортное плечо поставок газа с *i*-го месторождения, км; $Q_{зi}$ – объем замещаемого газа с *i* -го месторождения, 1000 м³; $Q_з$ – суммарный объем замещаемого газа со всех месторождений, 1000 м³; $Ц_{ФСТ}$ – регулируемые цены на газ в угольном регионе, устанавливаемые Федеральной службой по тарифам, руб./1000 м³.
Если изменение денежного потока отрицательно, поставки природного газа в регион рентабельны и их замещение угольным метаном приведет к ухудшению эффективности проекта за счет сокращения одного из положительных денежных потоков газодобывающего предприятия. И наоборот, если затраты на добычу и транспортировку газа превышают выручку от его реализации, замещение нерентабельных поставок повысит экономическую эффективность проекта вследствие дополнительного сокращения убытков газодобывающего предприятия

Экономический эффект от высвобождения природного газа на традиционных месторождениях за счет его замещения угольным метаном

Эффект от высвобождения природного газа на традиционных месторождениях за счет его замещения угольным метаном. Экономический смысл эффекта заключается в том, что вследствие постепенного истощения запасов газа основных месторождений Западной Сибири и необходимости ввода менее крупных месторождений в более сложных геологических и природно-климатических условиях затраты на добычу газа постоянно возрастают. Замещение поставляемого с месторождений природного газа метаном угольных пластов приведет к его фактическому высвобождению на месторождении и возможности его использования вместо наиболее дорогого газа других месторождений;

$$Э_{в.г} = \sum_{i=1}^{n}(Q_{зi}(Т_{д\,max} - Т_{дi} \pm \Delta(Т_{тi} \cdot l_i/100)))/(1+N_{пр}),$$

где $Э_{в.г}$ – эффект от высвобождения на месторождениях газа, замещаемого МУП, руб.; $Т_{д\,max}$ – внутренний расчетный тариф на добычу наиболее дорогого газа, которую можно сократить за счет высвобождении газа на *i*-м месторождении, руб./1000 м³; $\Delta(Т_{тi} \times l_i/100)$ – поправка на разницу в расходах на транспортировку газа между двумя указанными месторождениями, необходимая для учета их различного местоположения, руб./1000 м³; $N_{пр}$ – нормативная прибыль, используемая при расчете внутренних тарифов на газ добывающих организаций, %.
Данный экономический эффект будет положительным или равным нулю, если в регион поставляется наиболее дорогой газ газодобывающей компании

Экономический эффект от изменения загрузки газотранспортных мощностей

Эффект от изменения загрузки газотранспортных мощностей. Положительное или отрицательное влияние данного фактора на показатели экономической эффективности проекта будут зависеть от возможности и целесообразности увеличения поставок газа в другие регионы по тем участкам газопроводов, на которых вследствие замещения части транспортируемого газа угольным метаном образовался резерв мощности;

$$Э_{з.г.м} = N_{пр}(-Т_т \cdot l_з/100 \cdot Q_з + Т_т \cdot l_д / 100 \cdot Q_д),$$

где $Э_{з.г.м}$ – эффект от изменения загрузки газотранспортных мощностей, руб.; $N_{пр}$ – нормативная прибыль, используемая при расчете внутренних тарифов на услуги газотранспортных организаций, %; $Т_т$ – внутренний расчетный тариф на услуги по транспортировке газа, руб./1000 м³ на 100 км; $l_з$ – расстояние на которое транспортировался замещаемый газ, км; $Q_з$ – сокращение поставок газа (объем замещения газа, поставляемого в регион), 1000 м³; $l_д$ – расстояние, на которое будут транспортироваться дополнительные объемы газа, км; $Q_д$ – дополнительный объем газа, который может быть транспортирован взамен замещаемого, 1000 м³

Экономический эффект для государства от вовлечения в хозяйственный оборот трудноизвлекаемых ресурсов угольного метана

Экономический эффект для государства от вовлечения в хозяйственный оборот трудноизвлекаемых ресурсов угольного метана можно определить по формуле:

$$Э_{гос} = \sum_{i=1}^{n}\frac{Q_{з.г\,i}(Ц_{дi} - Ц_i)}{q_i} + Н_д \cdot (Э_{потр} + Э_{з.г} + Э_{в.г} + Э_{з.г.м}),$$

$Ц_{дi}$, $Ц_i$ – действующая в угольном регионе цена реализации газа или продуктов переработки и цена МУП или продуктов его переработки, (руб./1000 м³, руб./1 кВт × ч электроэнергии, руб./1 Гкал × ч тепла, руб./1 т сажи); q_i – удельный расход метана на производство единицы продукции *i*-го направления, м³/ед. продукции (1000 м³ метана, 1 кВт × ч электроэнергии, 1 Гкал × ч тепла, 1 т сажи и т. д.); $Н_д$ – доля налогов в прибыли потребителей газа и ПАО «Газпром», доли ед.; $Э_{потр}$ – экономический эффект для потребителей в угольном регионе в результате замещения поставок газа или продуктов переработки, руб.;

$$Э_{потр} = \sum_{i=1}^{n}\frac{Q_i(Ц_{дi} - Ц_i)}{q_i},$$

где Q_i – объем метана, перерабатываемый по *i*-му направлению, м³; *i* – направление использования извлеченного метана.
В случае, если цена на МУП и на получаемые из него продукты превышает действующие в угольном регионе цены, затраты потребителей остаются неизменными, так как цена останется прежней

При этом некоторые методы расчета экономических эффектов являются полностью новыми, а некоторые методы пересмотрены и дополнены в соответствии с выявленными экономическими и организационными особенностями работ по извлечению и использованию угольного метана. Все экономические эффекты приведены в табл. 1 без вычитания затрат на добычу и переработку газа.

Распределение приведенных в табл. 1 эффектов между государством и компаниями-участниками явилось основой для формирования предлагаемой модели.

Результаты работы и область их применения

Модель взаимодействия участников реализации проектов освоения ресурсов угольного метана включает:

– схему баланса интересов государства и компаний-участников;

– схемы распределения затрат и результатов между государством и компаниями-участниками при различных вариантах освоения ресурсов угольного метана;

– предельные значения экономических показателей, необходимых для реализации проектов освоения ресурсов угольного метана.

Общая схема баланса интересов между государством и компаниями-участниками проектов освоения ресурсов угольного метана представлена на рис. 1.

Все проекты по извлечению метана из угольных пластов можно разделить на два основных вида. К первому виду относятся проекты, в которых извлечение метана из угольных пластов представляет собой процесс дегазации угольных шахт. Для таких проектов характерно наличие как эффекта от использования метана, так и эффектов в угледобыче от проведения дегазации. Инициатором проекта в этом случае является угледобывающее предприятие. Добыча метана осуществляется на полях действующих или проектируемых шахт [14–16]. В зависимости от состава участников и способа распределения между ними затрат и результатов существует несколько вариантов реализации таких проектов.

В первом случае угледобывающее предприятие само осуществляет все работы по дегазации (табл. 2). Оно несет все затраты по дегазации и переработке газа и получает эффект от использования метана и эффекты в угледобыче от проведения дегазации.

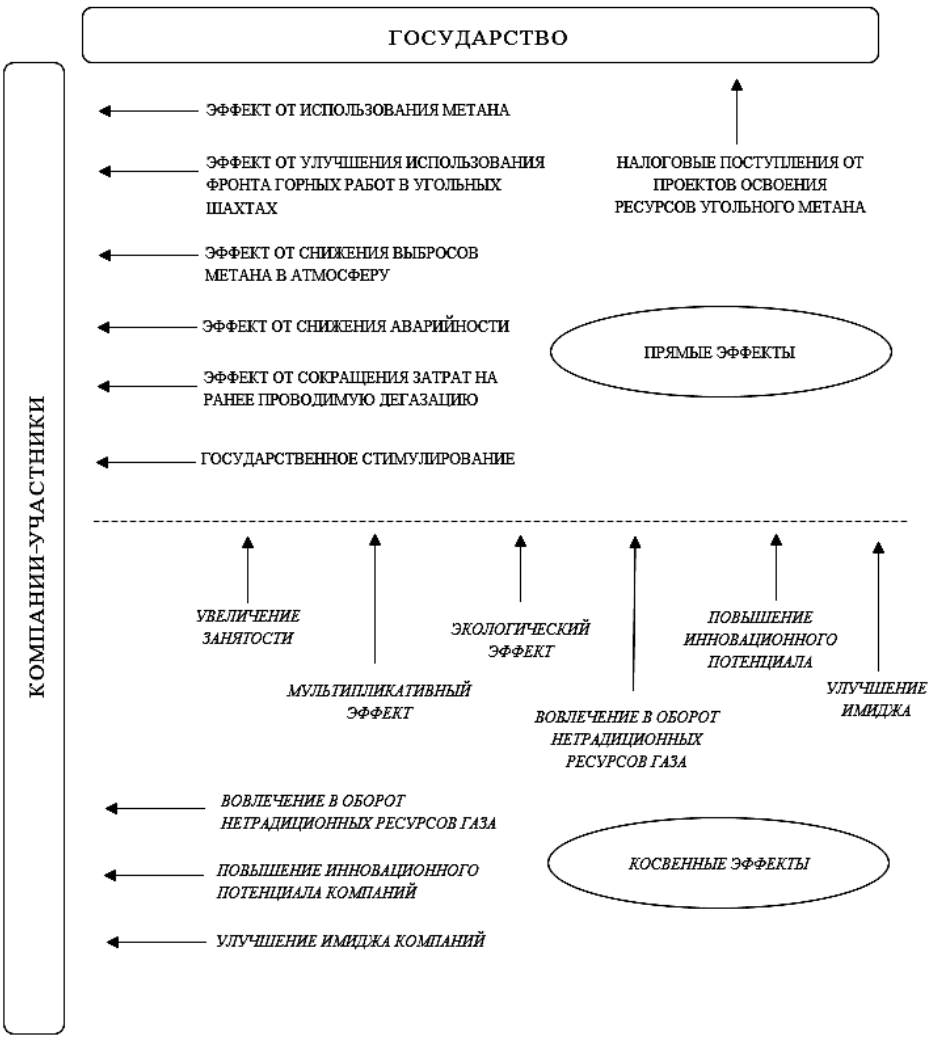


Рисунок 1. Схема баланса интересов государства и компаний-участников
Figure 1. The scheme of the balance of interests of the state and the participating companies

Таблица 2. Схема распределения затрат и результатов между государством и компаниями-участниками (вариант 1)
Table 2. Scheme of distribution of costs and benefits between the state and participating companies (option 1)

Участники проекта	Затраты	Результаты
Угледобывающее предприятие	Капитальные затраты на добычу и переработку газа Эксплуатационные затраты на добычу и переработку газа	*Прямые эффекты:* – экономические эффекты в угледобыче от дегазации; – экономический эффект от использования метана; – государственное стимулирование *Косвенные эффекты:* – повышение инновационного потенциала компаний; – улучшение имиджа компании
Государство	Государственное стимулирование	*Прямые эффекты:* – налоговые поступления от деятельности по добыче и переработке газа ($Н_г$); – налоговые поступления от деятельности по добыче дополнительных объемов угля, полученных в результате снижения влияния «газового фактора» ($Н_у$) *Косвенные эффекты:* – улучшение экологической ситуации; – увеличение занятости в районе работ; – мультипликативный эффект в смежных отраслях; – повышение инновационного потенциала страны; – улучшение имиджа страны; – вовлечение в хозяйственный оборот трудноизвлекаемых ресурсов угольного метана

Для эффективности проектов для компаний-участников необходимо, чтобы суммарные результаты от дегазации превышали затраты на добычу и переработку газа $З_{д.\,п}$:

$$З_{д.\,п} < (Э_{ав} + Э_{ш} + Э_{в} + Э_{р.\,д} + З_{и} + З_{г.\,с}) + (Э_{нт.\,п} + Э_{им}), \quad (1)$$

где $З_{г.\,с}$ – государственное стимулирование.

При этом максимальный размер государственного стимулирования $\max З_{г.\,с}$ не должен превышать прямые и косвенные результаты государства:

$$\max З_{г.\,с} = (Н_г + Н_у) + (Э_{з.\,н} + Э_{эк} + Э_{гос} + Э_{м} + Э_{нт.\,п} + Э_{им}). \quad (2)$$

В этом случае реализация проекта является выгодной и для государства.

Во втором случае угледобывающее предприятие взаимодействует с газодобывающим предприятием при осуществлении проекта. В зависимости от способа распределения между угледобывающим и газодобывающим предприятием затрат и результатов от дегазации можно выделить несколько вариантов осуществления таких проектов (табл. 3). Затраты и результаты для государства по варианту 2 определяются аналогично варианту 1. При этом государственное стимулирование распределяется между угледобывающим и газодобывающим предприятием в соответствии с их вкладом в достижение задач государства.

При первом варианте газодобывающее предприятие выступает в роли подрядчика по проведению работ по дегазации угольных пластов (вариант 2.1). Оно несет затраты по добыче газа и получает плату за дегазацию от угледобывающего предприятия $П_д$. Платежи за дегазацию при варианте 2.1 определяются по формуле:

$$П_д = З_д \cdot (1 + Н_{п.\,д}), \quad (3)$$

где $З_д$ – затраты на добычу газа; $Н_{п.\,д}$ – норма прибыли на добычу газа.

Для эффективности проектов для газодобывающего предприятия должно соблюдаться условие:

$$З_д < (П_д + З_{г.\,с.\,г}) + (Э_{з.\,г} + Э_{в.\,г} + Э_{з.\,г.\,м} + Э_{нт.\,п} + Э_{им}), \quad (4)$$

где $З_{г.\,с.\,г}$ – государственное стимулирование газодобывающего предприятия.

Для эффективности проектов для угледобывающего предприятия должно соблюдаться условие:

$$П_д < (Э_{ав} + Э_{ш} + Э_{в} + Э_{р.\,д} + З_{и} + З_{г.\,с.\,у}) + (Э_{нт.\,п} + Э_{им}), \quad (5)$$

где $З_{г.\,с.\,у}$ – государственное стимулирование угледобывающего предприятия.

Для эффективности проектов для государства должны соблюдаться условия:

$$\max З_{г.\,с.\,г} = Н_г + Э_{гос}; \quad (6)$$

$$\max З_{г.\,с.\,у} = Н_у + Э_{з.\,н} + Э_{эк} + Э_{м} + Э_{нт.\,п} + Э_{им}. \quad (7)$$

При варианте 2.2 газодобывающее предприятие также выступает в роли подрядчика по проведению работ по дегазации угольных пластов. Но в этом случае оно осуществляет как затраты по добыче газа, так и затраты по его переработке и получает плату за дегазацию и переработку метана от угледобывающего предприятия $П_{д.\,п}$. Платежи за дегазацию и переработку метана при варианте 2.2 определяются по формуле:

$$П_{д.\,п} = З_д (1 + Н_{п.\,д}) + З_{п.\,г} (1 + Н_{п.\,п.\,г}), \quad (8)$$

где $З_{п.\,г}$ – затраты на переработку газа; $Н_{п.\,п.\,г}$ – норма прибыли на переработку газа.

Таблица 3. Схема распределения затрат и результатов между компаниями-участниками (вариант 2)
Table 3. Scheme of distribution of costs and benefits between participating companies (option 2)

Участники проекта	Затраты	Результаты
		Вариант 2.1
Газодобывающее предприятие	Капитальные затраты на добычу газа Эксплуатационные затраты на добычу газа	*Прямые эффекты:* – платежи за дегазацию от угледобывающего предприятия; – государственное стимулирование *Косвенные эффекты:* – вовлечение в оборот нетрадиционных ресурсов газа в районах угледобычи; – повышение инновационного потенциала компаний; – улучшение имиджа компании
Угледобывающее предприятие	Капитальные затраты на переработку газа Эксплуатационные затраты на переработку газа Платежи за дегазацию газодобывающему предприятию	*Прямые эффекты:* – экономический эффект от использования метана; – экономические эффекты в угледобыче от дегазации; – государственное стимулирование *Косвенные эффекты:* – повышение инновационного потенциала компаний; – улучшение имиджа компании
		Вариант 2.2
Газодобывающее предприятие	Капитальные затраты на добычу газа Эксплуатационные затраты на добычу газа Капитальные затраты на переработку газа Эксплуатационные затраты на переработку газа	*Прямые эффекты:* – платежи за дегазацию и переработку метана от угледобывающего предприятия; – государственное стимулирование *Косвенные эффекты:* – вовлечение в оборот нетрадиционных ресурсов газа в районах угледобычи; – повышение инновационного потенциала компаний; – улучшение имиджа компании
Угледобывающее предприятие	Платежи за дегазацию и переработку метана газодобывающему предприятию	*Прямые эффекты:* – экономический эффект от использования метана; – экономические эффекты в угледобыче от дегазации; – государственное стимулирование *Косвенные эффекты:* – повышение инновационного потенциала компаний; – улучшение имиджа компании
		Вариант 2.3
Газодобывающее предприятие	Капитальные затраты на добычу газа Капитальные затраты на переработку газа Эксплуатационные затраты на добычу газа Эксплуатационные затраты на переработку газа	*Прямые эффекты:* – экономический эффект от использования метана; – платежи за дегазацию и переработку метана от угледобывающего предприятия; – государственное стимулирование *Косвенные эффекты:* – вовлечение в оборот нетрадиционных ресурсов газа в районах угледобычи; – повышение инновационного потенциала компаний; – улучшение имиджа компании
Угледобывающее предприятие	Платежи за дегазацию и переработку метана газодобывающему предприятию	*Прямые эффекты:* – экономические эффекты в угледобыче от дегазации; – государственное стимулирование *Косвенные эффекты:* – повышение инновационного потенциала компаний; – улучшение имиджа компании

Таблица 4. Схема распределения затрат и результатов между государством и компаниями-участниками (вариант 3)
Table 4. Scheme of distribution of costs and benefits between the state and participating companies (option 3)

Участники проекта	Затраты	Результаты
Газодобывающее предприятие	Капитальные затраты на добычу и переработку газа Эксплуатационные затраты на добычу и переработку газа	*Прямые эффекты:* – экономический эффект от использования метана; – государственное стимулирование. *Косвенные эффекты:* – вовлечение в оборот нетрадиционных ресурсов газа в районах угледобычи; – повышение инновационного потенциала компаний; – улучшение имиджа компании.
Государство	Государственное стимулирование	*Прямые эффекты:* – налоговые поступления от деятельности по добыче и переработке газа *Косвенные эффекты:* – увеличение занятости в районе работ; – вовлечение в хозяйственный оборот трудноизвлекаемых ресурсов угольного метана; – мультипликативный эффект в смежных отраслях; – повышение инновационного потенциала страны; – улучшение имиджа страны

Для эффективности проектов для газодобывающего предприятия должно соблюдаться условие:

$$З_д + З_{п.г} < (П_{д.п} + З_{г.с.г}) + (Э_{з.г} + Э_{в.г} + Э_{з.г.м} + Э_{нт.п} + Э_{им}). \quad (9)$$

Для эффективности проектов для угледобывающего предприятия должно соблюдаться условие:

$$П_{д.п} < (Э_{ав} + Э_{ш} + Э_{в} + Э_{р.д} + З_{и} + З_{г.с.у}) + (Э_{нт.п} + Э_{им}), \quad (10)$$

Для эффективности проектов для государства должны соблюдаться те же условия, что и по варианту 2.1.

При варианте 2.3 газодобывающее предприятие осуществляет все затраты по добыче и переработке метана и получает экономический эффект от использования метана и плату за дегазацию от угледобывающего предприятия.

Платежи за дегазацию и переработку метана в данном случае определяются по формуле:

$$П_{д.п} = З_д (1 + Н_{п.д}) + З_{п.г} (1 + Н_{п.п.г}) - Э_и. \quad (11)$$

В случае, если экономический эффект от использования метана превышает затраты на добычу и переработку газа с соответствующими нормами прибыли, то платежи за дегазацию и переработку метана равны нулю.

Для эффективности проектов для газодобывающего предприятия должно соблюдаться условие:

$$З_д + З_{п.г} < (П_{д.п} + З_{г.с.г} + Э_и) + (Э_{з.г} + Э_{в.г} + Э_{з.г.м} + Э_{нт.п} + Э_{им}). \quad (12)$$

Для эффективности проектов для угледобывающего предприятия должно соблюдаться условие:

$$П_{д.п} < (Э_{ав} + Э_{ш} + Э_{в} + Э_{р.д} + З_{и} + З_{г.с.у}) + (Э_{нт.п} + Э_{им}). \quad (13)$$

Для эффективности проектов для государства должны соблюдаться те же условия, что и по варианту 2.1.

Ко второму виду относятся проекты по добыче метана из угольных пластов, технологически не связанные с добычей угля. Такие проекты не могут считаться дегазацией угольных шахт и, следовательно, в них не возникают экономические эффекты в угледобыче в результате извлечения и использования метана. Инициатором проекта в этом случае является газодобывающее предприятие. Добыча газа ведется вне полей действующих или проектируемых шахт. Критерием целесообразности осуществления таких проектов можно считать достаточность эффекта от использования извлекаемого метана для окупаемости всех затрат по добыче и переработке газа. Результат осуществления таких проектов зависит от степени проницаемости угольных пластов, эффективности применяемых методов повышения газоотдачи, возможности получения налоговых льгот. Большим преимуществом таких проектов является отсутствие необходимости привязки работ по добыче газа к работам по добыче угля. Однако зачастую геологические условия и технологические возможности не позволяют окупить все затраты по добыче и переработке газа только за счет эффекта от использования метана, что требует дополнительного государственного стимулирования для повышения эффективности проектов данного вида [17–19]. Обоснованием для государственного стимулирования в таких проектах может считаться увеличение занятости в районе работ, а также вовлечение в хозяйственный оборот нетрадиционных трудноизвлекаемых ресурсов газа.

Для эффективности проектов промышленной добычи МУП для газодобывающего предприятия должно соблюдаться условие:

$$З_{д.г} < (Э_и + З_{г.с}) + (Э_{з.г} + Э_{в.г} + Э_{з.г.м} + Э_{нт.п} + Э_{им}), \quad (14)$$

где $З_{д.г}$ – затраты на промышленную добычу МУП.

Для эффективности проектов для государства должно соблюдаться условие:

$$\max З_{г.с} = Н_г + (Э_{з.н} + Э_{гос} + Э_м + Э_{нт.п} + Э_{им}). \quad (15)$$

Заключение

Предложенную модель взаимодействия государства и компаний-участников на основе баланса их интересов можно использовать при оценке эффективности инвестиций и при разработке стратегических планов по освоению ресурсов угольного метана. Модель позволяет рационально обосновать распределение затрат и результатов, а также определить условия достижения экономической эффективности для всех участников проектов по извлечению и использованию угольного метана. Результаты исследования, представленные в работе, имеют научную и практическую значимость и могут быть использованы студентами, аспирантами и преподавателями нефтегазовых и горных вузов, а также специалистами в области разработки газосодержащих угольных пластов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зафарова А. М. Оценка экономической эффективности изучения и освоения нетрадиционных видов углеводородов // Газовая промышленность. 2012. № 12. С. 30–33.
2. Chen H., Cheng Yu., Ren T., Zhou H., Liu Q. Permeability distribution characteristics of protected coal seams during unloading of the coal body // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. October 2014. Vol. 71. P. 105–116. https://doi.org/10.1016/J.IJRMMS.2014.03.018
3. Разработка нетрадиционных источников газа / Н. Д. Цхадая [и др.]. Ухта: УГТУ, 2003. 258 с.
4. Карасевич А. М., Зимаков Б. М., Сторонский Н. М., Хрюкин В. Т. Перспективы освоения и ресурсная база метана угольных пластов России // Газовая промышленность. 2004. № 8. С. 30–35.
5. Рубан А. Д., Забурдяев В. С., Забурдяев Г. С. Оценка ресурсов и объемов извлечения метана при подземной разработке угольных месторождений России. М.: ИПКОН РАН, 2005. 152 с.
6. Clarkson C. R. Production data analysis of unconventional gas wells: Review of theory and best practices // International Journal of Coal Geology. 2013. Vol. 109–110. P. 101–146. https://doi.org/10.1016/J.COAL.2013.01.002
7. Кошелец А. В. Формализация внешних факторов при оценке экономической эффективности разработки метаноугольных месторождений в системе ОАО «Газпром» // Газовая промышленность. 2012. № S(672). С. 72–75.
8. Пармузин П. Н. Определение дополнительных экономических и внеэкономических эффектов в проектах освоения ресурсов угольного метана // Бизнес. Образование. Право. Вестник Волгоградского института бизнеса. 2016. № 3 (36). С. 97–102.
9. Пармузин П. Н. Определение экономического эффекта в проектах дегазации угольных шахт // Известия УГГУ. 2016. Вып. 2(42). С. 82–85. https://doi.org/10.21440/2307-2091-2016-2-82-85
10. Laubach S. E., Marrett R. A., Olson J. E., Scott A. R. Characteristics and origins of coal cleat: A review // International Journal of Coal Geology. 1998. Vol. 35. Issue 1–4. P. 175–207. https://doi.org/10.1016/S0166-5162(97)00012-8
11. Garrison J. R. Jr., Van Den Bergh T. C. V., Barker C. E., Tabet D. E. Depositional sequence stratigraphy and architecture of the Cretaceous Ferron Sandstone: Implications for coal and coalbed methane resources – A field excursion // Mesozoic to Recent Geology of Utah. Ed. by P. K. Link, B. J. Kowallis. Provo, Utah: Brigham Young University Geology Studies, 1997. Vol. 42. Part II. P. 155–202.
12. Шувалов Ю. В., Бобровников В. Н., Черников П. В. О развитии дегазации на шахтах Воркуты // ГИАБ. 2002. № 6. С. 157–159.
13. Широв А. А., Янтовский А. А. Оценка мультипликативных эффектов в экономике. Возможности и ограничения // ЭКО. Всероссийский экономический журнал. 2011. № 2. С. 40–58.
14. Голицын М. В., Богомолов А. Х., Вялов В. И., Зайцев В. А., Макарова Е. Ю., Митронов Д. В., Пронина Н. В., Черников А. Г. Метаноугольные бассейны и месторождения России. Пути решения проблем добычи метана из угольных пластов // Геология нефти и газа. 2013. № 3. С. 88–95.
15. Сластунов С. В., Ютяев Е. П. Обоснованный выбор технологии пластовой дегазации для обеспечения безопасности подземных горных работ при интенсивной добыче угля // Записки горного института. 2017. Т. 223. С. 125–130. https://doi.org/10.18454/PMI.2017.1.125
16. Liu J., Chen Z., Elsworth D., Miao X., Mao X. Evolution of coal permeability from stress-controlled to displacement-controlled swelling conditions // Fuel. 2011. Vol. 90. Issue 10. P. 2987–2997. https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2011.04.032
17. Пучков Л. А., Сластунов С. В., Коликов К. С. Извлечение метана из угольных пластов. М.: Изд-во МГГУ, 2002. 384 с.
18. Mavor M. J., Nelson C. R. Coalbed reservoir gas-in-place analyses. Chicago: Gas Research Institute, 1997. 130 p.
19. Puri R., Yee D., Enhanced Coalbed Methane Recovery // 65th Annual Technical Conference and Exhibition, September 23–26. New Orleans, Louisiana: Society for Petroleum Engineers, 1990. Vol. 65. P. 193–202. https://doi.org/10.2118/20732-MS

Статья поступила в редакцию 13 декабря 2023 года

UDC 622.324.5:005.21 http://doi.org/10.21440/2307-2091-2024-1-153-163

Model of interaction between participants in the implementation of projects for the development of coalbed methane resources

Petr Nikolaevich PARMUZIN*

Ukhta State Technical University, Ukhta, Komi Republic, Russia

Abstract

Relevance. The sustainable development of the industry for the extraction and use of coalbed methane largely depends on how well the interests are coordinated between the state and the companies participating in the projects. Therefore, the formation of a model of interaction between participants in the implementation of projects for the development of coalbed methane resources is an urgent economic task.

The purpose of the study is to formulate and solve a scientific problem related to the formation of a model of interaction between participants in the implementation of projects for the development of coalbed methane resources.

Research methods. The work uses: a logical approach to defining the basic concepts of the theory and practice of strategic management; systematic approach to management; principles of strategic, situational and dynamic analysis; tools for economic and mathematical modeling.

Results. An analysis of options for the development of gas-containing coal seams was carried out. A set of methods for determining direct and indirect effects from the extraction and use of coalbed methane has been developed. Based on the analysis carried out and the methods developed, a model of interaction between participants in the implementation of projects for the development of coalbed methane resources has been developed, taking into account the balance of their interests. The proposed model includes: a scheme for balancing the interests of the state and participating companies; schemes for distributing costs and results between the state and participating companies for various options for developing coalbed methane resources; limit values of economic indicators necessary for the implementation of projects for the development of coalbed methane resources.

Conclusion. The proposed model can be used in assessing the effectiveness of investments and in developing strategic plans for the development of coalbed methane resources. The model allows you to rationally justify the distribution of costs and results, as well as determine the conditions for achieving economic efficiency for all project participants.

***Keywords*:** coalbed methane, economic effect, economic modeling, balance of interests, government incentives, strategic planning.

REFERENCES

1. Zafarova A. M. 2012, Assessment of the economic efficiency of studying and developing unconventional types of hydrocarbons. *Gazovaya promyshlennost'* [Gas Industry], no. 12, pp. 30–33. (*In Russ.*)
2. Chen H., Cheng Yu., Ren T., Zhou H., Liu Q. 2014, Permeability distribution characteristics of protected coal seams during unloading of the coal body. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 71, pp. 105–116. https://doi.org/10.1016/J.IJRMMS.2014.03.018
3. Tskhadaya N. D. [et al.]. 2003, Development of unconventional gas sources. Ukhta, 258 p. (*In Russ.*)
4. Karasevich A. M., Zimakov B. M., Storonsky N. M., Khryukin V. T. 2004, Prospects for the development and resource base of coal seam methane in Russia. *Gazovaya promyshlennost'* [Gas Industry], no. 8, pp. 30–35. (*In Russ.*)
5. Ruban A. D., Zaburdyaev V. S., Zaburdyaev G. S. 2005, Assessment of resources and volumes of methane extraction during underground mining of coal deposits in Russia. Moscow, 152 p. (*In Russ.*)
6. Clarkson C. R. 2013, Production data analysis of unconventional gas wells: Review of theory and best practices. *International Journal of Coal Geology, v*ol. 109–110, pp. 101–146. https://doi.org/10.1016/J.COAL.2013.01.002
7. Koshelets A. V. 2012, Formalization of external factors when assessing the economic efficiency of the development of methane-coal deposits in the system of OJSC Gazprom. *Gazovaya promyshlennost'* [Gas Industry], no. S (672), pp. 72–75. (*In Russ.*)
8. Parmuzin P. N. 2016, Determination of additional economic and non-economic effects in projects for the development of coalbed methane resources. *Biznes. Obrazovaniye. Pravo. Vestnik Volgogradskogo instituta biznesa* [Business. Education. Right. Bulletin of the Volgograd Institute of Business], no. 3 (36), pp. 97–102. (*In Russ.*)
9. Parmuzin P. N. 2016, Determination of the economic effect in coal mine degassing projects. *Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta* [News of the Ural State Mining University], issue 2 (42), pp. 82–85. (*In Russ.*) https://doi.org/10.21440/2307-2091-2016-2-82-85
10. Laubach S. E., Marrett R. A., Olson J. E., Scott A. R. 1998, Characteristics and origins of coal cleat: A review. *International Journal of Coal Geology*, vol. 35, issue 1–4, pp. 175–207. https://doi.org/10.1016/S0166-5162(97)00012-8
11. Garrison J. R. Jr., Van Den Bergh T. C. V., Barker C. E., Tabet D. E. 1997, Depositional sequence stratigraphy and architecture of the Cretaceous Ferron Sandstone: Implications for coal and coalbed methane resources – A field excursion. *Mesozoic to Recent Geology of Utah*. Utah, vol. 42, part II, pp. 155–202.
12. Shuvalov Yu. V., Bobrovnikov V. N., Chernikov P. V. 2002, On the development of degassing in the mines of Vorkuta. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mining information and analytical bulletin], no. 6, pp. 157–159. (*In Russ.*)
13. Shirov A. A., Yantovsky A. A. 2011, Assessment of multiplier effects in economics. Features and Limitations. *EKO. Vserossiyskiy ekonomicheskiy zhurnal* [ECO. All-Russian Economic Journal], no. 2, pp. 40–58. (*In Russ.*)

✉ptr12@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-8868-830X

14. Golitsyn M. V., Bogomolov A. Kh., Vyalov V. I., Zaitsev V. A., Makarova E. Yu., Mitronov D. V., Pronina N. V., Chernikov A. G. 2013, Methane-coal basins and fields of Russia. Ways to solve problems of methane production from coal seams. *Geologiya nefti i gaza* [Geology of oil and gas], no. 3, pp. 88–95. (*In Russ*.)
15. Slastunov S. V., Yutyaev E. P. 2017, Justified choice of reservoir degassing technology to ensure the safety of underground mining during intensive coal mining. *Zapiski gornogo instituta* [Notes of the Mining Institute], vol. 223, pp. 125–130. (*In Russ*.) https://doi.org/10.18454/PMI.2017.1.125
16. Liu J., Chen Z., Elsworth D., Miao X., Mao X. 2011, Evolution of coal permeability from stress-controlled to displacement-controlled swelling conditions. *Fuel*, vol. 90, issue 10, pp. 2987–2997. https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2011.04.032
17. Puchkov L. A., Slastunov S. V., Kolikov K. S. 2002, Extraction of methane from coal seams. Moscow, 384 p. (*In Russ*.)
18. Mavor M. J., Nelson C. R. 1997, Coalbed reservoir gas-in-place analyses. Chicago, 130 p.
19. Puri R., Yee D., 1990, Enhanced Coalbed Methane Recovery, 65th Annual Technical Conference and Exhibition. New Orleans, vol. 65, pp. 193–202. https://doi.org/10.2118/20732-MS

The article was received on December 13, 2023

УДК 338.012 http://doi.org/10.21440/2307-2091-2024-1-164-171

Эффективное управление минерально-сырьевой базой предприятий горнодобывающей отрасли как фактор экономической безопасности страны

Сергей Миншакирович САЛЬМАНОВ*

АО «Полиметалл УК», Санкт-Петербург, Россия

Аннотация

Актуальность. Критически важные минералы являются основой, краеугольным камнем нового витка промышленной революции и сырьем практически для всех секторов мировой экономики. В связи с этим очевидным является тот факт, что горнодобывающая промышленность представляет собой одну из важнейших отраслей в мире и является основой для стабильного развития экономики. Спрос на добываемые ресурсы в ближайшие годы будет продолжать расти благодаря ускоряющемуся научно-техническому процессу, растущему населению и глобальному переходу к низкоуглеродным, но металлоемким технологиям производства энергии. Эти тенденции дают все основания утверждать, что минерально-сырьевая база представляет собой один из ключевых элементов экономической безопасности стран мира.

Цель работы – разработка адаптивной и эффективной концепции управления сектором добычи природных ресурсов. Эта концепция должна учитывать значимость минерально-сырьевой базы для экономической безопасности страны, должна выходить за рамки простого инструмента эффективного корпоративного управления, поскольку в глобальном мире, в условиях все больше нарастающей зависимости между странами система менеджмента должна охватывать широкий спектр заинтересованных сторон на разных уровнях.

Методы. В процессе исследования использовались общенаучные и специальные методы научного познания, а именно: анализ и синтез, сравнение, систематизация, обобщение, группировка, абстракция.

Результаты работы и область применения. В статье обозначены участники контура управления минерально-сырьевой базой горнодобывающих предприятий, формализованы цепочки создания стоимости, характерные для добывающего сектора. Отдельное внимание уделено принципам эффективного управления минерально-сырьевой базой на уровне горнодобывающего предприятия. На примере компании «Полиметалл» показано практическое применение концепции кластерного подхода к управлению минерально-сырьевой базой. Полученные результаты могут использоваться государственными органами и частными горнодобывающими и геологоразведочными предприятиями для усовершенствования методов и инструментов в сфере управления минерально-сырьевой базы.

Вывод. На основании полученных результатов в статье представлена концепция эффективного управления минерально-сырьевой базой горнодобывающих предприятий, основанная на кластерном подходе.

***Ключевые слова*:** управление, горнодобывающее предприятие, минералы, сырье, база, государство, экология, общество, участники, рынок.

Введение

Обеспечение экономической безопасности страны – актуальная научно-практическая проблема современности. Очевидно, что экономическая безопасность отдельного государства имеет широкий спектр составляющих элементов, и вокруг вопроса, касающегося выбора стратегических приоритетов ее укрепления, ведутся постоянные дискуссии ученых, управленцев, экономистов и политиков. Например, некоторые считают, что экономическая безопасность может ограничиться контролем над чувствительными технологиями, такими как высокотехнологичное оборудование для производства полупроводников. Другие полагают, что она может распространяться на критически важные для цепочек создания добавленной стоимости поставки, такие как редкоземельные минералы. Третьи предлагают укрепить экономическую безопасность за счет создания более широкой промышленной базы и реализацией инфраструктурных проектов. Другими словами, до сих пор открытым остается вопрос относительно того, на чем необходимо сосредоточить усилия, чтобы обеспечить высокий уровень экономической безопасности страны. Этот вопрос приобретает особую актуальность в современных геополитических и геоэкономических условиях.

Во многих исследованиях и экспертных отчетах на сегодняшний день выдвигается предположение, что уровень экономической безопасности стран может быть повышен на основе эффективного управления минерально-сырьевой базой [1]. Этот тезис основывается на нескольких фактах.

✉Salmanov@polymetal.ru

Во-первых, в условиях роста потребления энергии экономическая безопасность может базироваться на энергетической безопасности, которая обеспечивается минерально-сырьевой базой, что неоднократно подчеркивалось разными учеными [2].

Во-вторых, минералы и металлы являются компонентами, необходимыми для производства множества товаров и услуг, которые важны для современных обществ и часто служат основой сложных промышленных систем. Развитие современного, материалоемкого образа жизни привело к значительному ускорению их производства, особенно с середины XX в. [3]. Несмотря на весь прогресс, который может и должен быть достигнут на пути к циркулярной, ресурсоэффективной глобальной экономике, ряд важных тенденций, включая темпы развития научно-технического прогресса, демографический рост, быстрое развитие глобального среднего класса, растущую урбанизацию и переход к низкоуглеродной экономике, указывают на продолжение экспоненциального роста мирового спроса и производства минералов и металлов [4]. За последние 35 лет в мире использовано 80–85 % добытых за весь исторический период нефти и газа. С 1974 по 2007 г. потребление энергоносителей в мире удвоилось; потребление других видов минерального сырья выросло в три-пять и более раз. По прогнозам Всемирного банка, спрос на металлы и полезные ископаемые быстро вырастет вместе с климатическими амбициями. Наиболее ярким примером этого являются аккумуляторные батареи, спрос на соответствующие металлы для которых – алюминий, кобальт, железо, свинец, литий, марганец и никель – вырастет более чем на 1000 % к 2050 г. [5].

Таким образом, даже самые сильные экономики мира нуждаются в постоянном и безопасном доступе к минерально-сырьевым ресурсам для поддержания непрерывного роста и обеспечения стабильности, и эта зависимость обычно усиливается по мере технологического развития производственных комплексов. Очевидно, что управление минерально-сырьевой базой в целом реализуется посредством управления ее составляющими на различных уровнях. Стратегия развития минерально-сырьевой базы страны разрабатывается на государственном уровне. Тактические задачи решаются на уровне предприятий горнодобывающей отрасли.

Эффективность управления минерально-сырьевой базой горнодобывающих предприятий зависит от институциональных, горно-геологических, природно-климатических факторов, которые на начальном этапе отработки месторождения являются объективными и независимыми от корпоративной структуры [6]. В дальнейшем результаты управления могут ухудшаться вследствие осуществления нерационального использования недр, применения устаревших технологий и максимизации краткосрочных экономических результатов, что в целом влияет на энергетическую безопасность страны, а затем и на ее экономическую безопасность.

Таким образом, обозначенная проблема повышения уровня экономической безопасности стран и связанная с ней задача определения эффективного управления минерально-сырьевой базой предприятий горнодобывающей отрасли являются актуальными и своевременными для исследования, что и обуславливает выбор темы данной статьи.

Цель работы

Целью работы является разработка адаптивной и эффективной концепции управления сектором добычи природных ресурсов. Эта концепция должна учитывать значимость минерально-сырьевой базы для экономической безопасности страны, должна выходить за рамки простого инструмента эффективного корпоративного управления, поскольку в глобальном мире, в условиях все больше нарастающей зависимости между странами, система менеджмента должна охватывать широкий спектр заинтересованных сторон на разных уровнях.

Методы

В процессе исследования использовались общенаучные и специальные методы научного познания, а именно: анализ и синтез, сравнение, систематизация, обобщение, группировка, абстракция.

Стратегии и методы управления минеральными ресурсами в XXI в. в контексте глобальных вызовов и климатических угроз разрабатывают в своих трудах Е. С. Мелехин, Н. В. Пашкевич, В. А. Воронин, Xu Minghao.

Связь стратегического бизнес-планирования работы горнодобывающего предприятия и планирования жизненного цикла месторождения описывают в своих публикациях А. В. Душина, З. М. Назарова, Е. Г. Ожогина, Е. В. Кузнецова, В. С. Дадыкин, Jair Santillán-Saldivar, Tobias Gaugler.

Исключительная роль минерально-сырьевой базы в обеспечении экономической безопасности страны подчеркивается в работах С. Ю. Глазьева, Е. А. Козловского, В. А. Крюкова, В. С. Литвиненко.

Наличие значительного научного наследия, которое сформировано на сегодняшний день, свидетельствует о том, что изучаемой проблематике уделяется большое внимание в разных странах мира. Однако развитие Четвертой промышленной революции, возникновение новых климатических угроз, турбулентность в глобальной экономике актуализируют ряд новых вопросов, решение которых требует проведения дополнительных, более углубленных исследований.

Результаты работы

Одним из значимых элементов экономической безопасности страны, как уже было отмечено, является рациональная и экономически эффективная добыча полезных ископаемых. Однако современный человек, привыкший к доступности минеральных ресурсов, забывает о важнейшем факте, который заключается в неизбежном истощении невозобновляемых сырьевых ресурсов. В данном контексте не подлежит сомнению тот факт, что, начиная от открытия и до закрытия месторождения, управление минерально-сырьевой базой горнодобывающего предприятия требует изменения стратегий развития в направлении ресурсосбережения, а также внедрения и интеграции передовых технологий в систему управления минеральными ресурсами [7].

Необходимо отметить, что управление минерально-сырьевой базой предприятий горнодобывающей промышленности – это процесс, характеризующийся участи-

Таблица 1. Участники контура управления минерально-сырьевой базой горнодобывающих предприятий (составлено автором)
Table 1. Participants in the management loop of the mineral resource base of mining enterprises (compiled by the author)

Категории	Описание
Заинтересованные стороны	Правительства, региональные власти, межправительственные организации, банки развития и инвестиционные банки, страховые компании, инвесторы, акционеры и различные сообщества в рамках гражданского общества (потребители, рабочие, местное население, профсоюзы и СМИ). Различные интересы, социальные, культурные, политические, экономические, экологические
География (пространство и время)	Различные пространственные и временные масштабы, включая местный, национальный, региональный и международный, а также прошлое, настоящее, будущее и межпоколенческий период. Пространственные границы часто не соответствуют биофизическим и территориальным характеристикам ресурсов (в частности, минеральные ресурсы связаны с геологией, а не с политическими границами). Временные масштабы часто не согласуются с процессами принятия решений
Властные отношения	Асимметричные отношения власти, авторитета, сотрудничества или влияния на нескольких уровнях. Вертикальные, когда преобладает иерархия, горизонтальные, когда преобладают сотрудничество и добровольность
Нормативные рамки	Более формальные нормативные рамки включают договоры, законы, политику, контрактные соглашения и технические стандарты. Менее формальные нормативные рамки включают административные, коммерческие, профессиональные/культурные практики и межличностные отношения

ем широкого спектра заинтересованных сторон (например, правительства, предприятия, гражданского общества), нормативных рамок (например, законов, политики, соглашений), иерархических отношений и соответствующих пространственных масштабов (например, глобального, национального, местного). В табл. 1 детализованы эти заинтересованные стороны и их участие, влияние и роли в управлении минерально-сырьевой базой.

Для каждого предприятия, входящего в корпоративную структуру добывающей отрасли, характерны собственные геологические условия месторождения и специфика его разработки, что в свою очередь формирует различные предпосылки эффективности управления производственными и коммерческими процессами, экономической безопасностью территории и страны в целом [8]. Поскольку получение предприятиями экономических результатов обеспечивается использованием минерально-сырьевых ресурсов, важное место при определении уровня их экономической безопасности и уровня экономической безопасности страны в целом занимает оценка перспектив развития сырьевой базы (рис. 1).

Для того чтобы выработать эффективные решения, касающиеся управления минерально-сырьевой базой горнодобывающих предприятий на всех уровнях, способных укрепить экономическую безопасность страны, представляется необходимым четко формализовать цепочки создания стоимости, характерные для добывающего сектора.

По мнению автора, такими цепочками являются следующие:

1. Цепочка создания стоимости в добывающем секторе (вверх по потоку): основное внимание уделяется механизмам управления, связанным с добычей минералов и металлов и сопутствующей торговлей добытыми ресурсами на рынках дружественных стран.

2. Цепочка создания стоимости в сфере переработки и сбыта: основное внимание уделяется механизмам управления, связанным с продукцией, полученной из минералов и металлов, включая всестороннее рассмотрение жизненного цикла материалов и конечных потребителей продукции. Растущий спрос потребителей на экологически чистую продукцию становится все более важной характеристикой управления в добывающем секторе.

3. Цепочка создания стоимости, связанная с экономикой: основное внимание уделяется механизмам управления, которые влияют на то, как различные заинтересованные стороны получают выгоду от горнодобывающей деятельности.

С экономической точки зрения эффективное управление минерально-сырьевой базой предприятий горнодобывающей отрасли требует наличия адекватных стимулов для привлечения капиталовложений в рискованную бизнес-среду, а также стабильного режима налогообложения и эффективных механизмов распределения прибыли, обеспечивающих справедливую долю доходов для инвесторов [9, 10]. Однако помимо этого основного вопроса управления существуют и другие фундаментальные проблемы, связанные с мониторингом, регулированием и оценкой, решение которых позволит избежать негативных последствий добычи полезных ископаемых и обеспечить получение выгод для участвующих в процессе недропользования сообществ, добывающей промышленности и экономической безопасности страны в целом.

В связи с этим представляется целесообразным сформулировать принципы эффективного управления минерально-сырьевой базой.

1. Частно-государственная собственность на минерально-сырьевые ресурсы корпоративных структур добывающей отрасли за исключением стратегических, что повышает инвестиционную привлекательность и гарантирует повышение уровня экономической безопасности страны.

2. Диверсифицированное потребление минеральных ресурсов по источникам – собственно минерально-сырьевая база и альтернативные источники их восполнения (техногенные месторождения, рециклинг, искусственные заменители ресурсов), что позволит сохранить минерально-сырьевые ресурсы в качестве стратегического запаса страны на будущее и обеспечивать ее устойчивое развитие на основе сохранения ресурсов для следующих поколений.

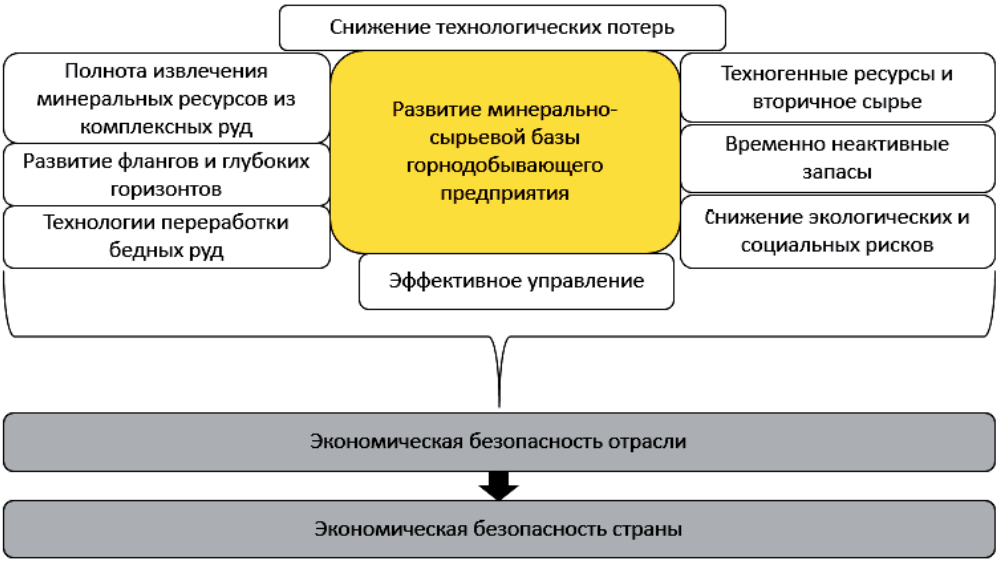


Рисунок 1. Развитие минерально-сырьевой базы горнодобывающих предприятий как фактор экономической безопасности страны (разработано автором)
Figure 1. Development of the mineral resource base of mining enterprises as a factor in the economic security of the country (developed by the author)

3. Диверсифицированное потребление минеральных ресурсов по признаку импорта и собственной добычи, что позволит найти рациональный баланс между уровнем минерально-ресурсного суверенитета, представляющего собой независимость поставок из других стран в краткосрочном периоде, и устойчивым развитием, обеспечивающим экономическую безопасность страны в долгосрочном периоде.

4. Определение методики расчета индекса экономической безопасности страны в зависимости от уровня эффективности управления минерально-сырьевой базой предприятий добывающей отрасли.

В настоящее время выработано не менее 80 инструментов управления минерально-сырьевой базой предприятий горнодобывающей промышленности, включая платформы для диалога; юридически обязательные инструменты, национальные законы с международными последствиями, рыночные инструменты [11]. Существующие инструменты также охватывают различные географические регионы – от конкретных объектов до глобальных инициатив [12]. В попытке упорядочить механизмы и инструменты управления в различных исследованиях ставится задача выйти за рамки одноаспектных определений и разработать методологию или модели управления минерально-сырьевой базой на различных уровнях.

Широкий спектр инструментов охватывает континуум различных управленческих подходов – от институциональной автономии или самоуправления (директивные, вертикальные и односторонние) до государственно-частных сетей (самоорганизующиеся, горизонтальные и многосторонние) [13, 14]. Этот спектр также варьируется от четко разграниченных ролей, например, в одной государственной структуре, до более диффузных и открытых ролей между различными участниками и в то же время является временным континуумом – от долгосрочного, постоянного институционального взгляда до краткосрочного управления на уровне конкретного субъекта хозяйствования [15, 16].

С учетом существующих на сегодняшний день точек зрения и имеющихся наработок на рис. 2 представлена разработанная автором концепция эффективного управления минерально-сырьевой базой предприятий горнодобывающей отрасли, которая опирается на кластерный подход. В рамках концепции выделены 4 кластера, обладающие определенной внутренней согласованностью, но также дополняющие друг друга и, конечно, частично перекрывающиеся. Это означает, что эффективное управление минерально-сырьевой базой опирается на синергию моделей, а не на какую-либо одну из них.

Первый кластер (красный) рассматривает управление с точки зрения внутренней деятельности горнодобывающих предприятий как субъектов хозяйствования и четко ограничивается концепцией корпоративного управления. В этом кластере акцент сделан на практике управления, руководствующейся принципами участия и прозрачности как на желательной составляющей эффективного корпоративного управления для улучшения финансовых показателей.

Второй кластер (зеленый) ориентирован на ту же проблематику, что и первый, но с точки зрения внешних показателей, как управление, обусловленное природой контекста и самого объекта управления. Этот кластер ближе к анализу контекстуального или территориального управления, он предполагает осознание обусловливающего влияния социально-политических условий на горнодобывающие предприятия, поиск инструментов для их адаптации к требованиям внешней среды с целью нахождения решений по управлению различного рода рисками.

Третий кластер (голубой) рассматривает управление минерально-сырьевой базой уже с точки зрения создания ценности на уровне горнодобывающей промышленности (обеспеченность энергетическими ресурсами, использо-

Рисунок 2. Концепция эффективного управления минерально-сырьевой базой горнодобывающих предприятий (составлено автором)
Figure 2. The concept of effective management of the mineral resource base of mining enterprises (compiled by the author)

вание передовых технологий, соблюдение экологических норм, энергетическая безопасность), одновременно указывая на ключевую роль государства как части этого контура управления.

Четвертый кластер (желтый) расширяет понятие управления, перенося его в область технологий для повышения эффективности горной добычи. Главная особенность этого кластера – реализация управления как стратегического инструмента, эффективного в достижении комплексной синергии добычи и использования природных ресурсов с экономической безопасностью страны.

Наиболее ярким примером применения представленной концепции может выступить горнодобывающая компания «Полиметалл», которая является лидером по производству серебра в России и занимает второе место по добыче и производству золота.

Так, в соответствии с первым кластером корпоративное управление компанией осуществляется в соответствии с корпоративным кодексом, с учетом лучших мировых практик, и отвечает правилам листинга Московской фондовой биржи. Производственно-экономические результаты компании подтверждают эффективность управления своим долгосрочным ростом.

Активное участие в социально-экономической жизни в регионах присутствия, широкая география найма сотрудников, регулярное проведение социально-благотворительных мероприятий, адресная помощь коренным малочисленным народам Российского Севера обеспечивают тесный контакт менеджмента и общества, что предусмотрено вторым кластером концепции управления.

Третий кластер управления в компании выражен в развитии политик безопасности труда, минимизации экологических рисков и эффективном взаимодействии с органами власти. В своей деятельности компания создает культуру «нулевого травматизма», при которой каждый работник берет на себя личную ответственность как за собственную безопасность, так и за безопасность своих коллег. В процессе своей деятельности компания стремится минимизировать влияние на окружающую среду и биоразнообразие, обеспечивая максимально эффективное использование природных ресурсов и внедряя системы управления, формирующие комплексный подход к безопасному и ответственному недропользованию. Взаимодействие с органами власти строится на основании взаимовыгодных соглашений о сотрудничестве.

Компания «Полиметалл» в своей деятельности сочетает как традиционные, так и передовые технологии добычи и переработки руд благородных металлов. Так, компания первая в России запустила комплекс по переработке упорных концентратов для максимизации извлечения. Опыт в области селективной открытой и подземной добычи и внедрение передовых технологий контроля за содержанием и разубоживанием позволяет максимально полно отрабатывать месторождения и минимизировать потери полезных компонентов в недрах. Применение современных технологий соответствует условиям четвертого кластера концепции управления.

Заключение

Подводя итоги, отметим, что с учетом высокой значимости для промышленности и общества в целом минералов и металлов, экономическая независимость стран в значительной степени определяется их минерально-сырьевым суверенитетом, который основывается на эффективном управлении и использовании минерально-сырьевой базы. В данном контексте в статье представлены принципы, уровни и концептуальная модель эффективного управления минерально-сырьевой базой горнодобывающих предприятий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Родин Н. С. Стратегическое управление минерально-сырьевой базой России // Актуальные исследования. 2022. № 20 (99). С. 52–55.
2. Мелехин Е. С. Применение проектных методов управления в недропользовании // Проблемы экономики и управления нефтегазовым комплексом. 2021. № 2 (194). С. 44–49. https://doi.org/10.33285/1999-6942-2021-2(194)-44-49
3. An L., Jiang X., Liu Z., Li Q. Socio-economic impact of natural resource management: How environmental degradation affects the quality of life // Geological Journal. 2023. Vol. 58. Issue 9. P. 3310–3325. https://doi.org/10.1002/gj.4787
4. Xu Y. Financial development, financial inclusion and natural resource management for sustainable development: Empirical evidence from Asia // Geological Journal. 2023. Vol. 58. Issue. 9. P. 3288–3300. https://doi.org/10.1002/gj.4825
5. The Growing Role of Minerals and Metals for a Low Carbon Future. R. Puliti (ed.). Washington, DC, USA: World Bank Publications, 2017. 92 p. URL: http://hdl.handle.net/10986/28312
6. Еремеева О. С., Мочалова Л. А. Организационно-экономический механизм циркулярного недропользования // Journal of New Economy. 2023. Vol. 24. No. 1. P. 104–125. https://doi.org/10.29141/2658-5081-2023-24-1-5
7. Багатаев Р. М. Минерально-ресурсный потенциал как фактор экономического роста Дагестана // УЭПС: управление, экономика, политика, социология. 2021. № 1. С. 27–35.
8. Puntillo P., Gulluscio C., Huisingh D., Veltri S. Reevaluating waste as a resource under a circular economy approach from a system perspective: Findings from a case study // Business Strategy and the Environment. 2020. Vol. 30. Issue 2. P. 968–984. https://doi.org/10.1002/bse.2664
9. Батугина Н. С. Роль минерально-сырьевых ресурсов в экономике Республики Саха (Якутия) // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2023. № 4 (183). С. 41–48.
10. Ребрик М. О. Влияние «китайского экономического чуда» на развитие минерально-сырьевой базы // Экономика: вчера, сегодня, завтра. 2022. Т. 12. № 5А. С. 118–128. https://doi.org/10.34670/AR.2022.47.33.013
11. Elkhan R. S.-Z. Natural resources, technological progress, and economic modernization // Review of Development Economics. 2021. Vol. 25. Issue 1. P. 381–404. https://doi.org/10.1111/rode.12716
12. Якушина О. И., Печенкин И. Г., Луговская И. Г. Организационно-управленческие решения по созданию отечественной минерально-сырьевой базы в начале XX века // ГИАБ. 2023. № 7. С. 166–179. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_7_0_166
13. Кузина Е. С. Принципы формирования структуры минерально-сырьевого капитала // Финансовые рынки и банки. 2021. № 6. С. 9–12.
14. Альбертян А. П. Развитие минерально-сырьевого комплекса как повышение геополитического статуса России // Мировая политика. 2022. № 1. С. 48–58. https://doi.org/10.25136/2409-8671.2022.1.37713
15. Rodríguez-López N., Coronado Mondragon A. E. The impact of supply chain integration from the Service-Dominant Logic perspective: Operant resources and value generation // European Management Review. 2023. No. 6. P. 1–17. https://doi.org/10.1111/emre.12566
16. Xiaoman W., Majeed A., Vasbieva D. G., Yameogo C. E. W., Hussain N. Natural resources abundance, economic globalization, and carbon emissions: Advancing sustainable development agenda // Sustainable Development. 2021. Vol. 29. Issue 5. P. 1037–1048. https://doi.org/10.1002/sd.2192

Статья поступила в редакцию 23 января 2024 года

UDC 338.012 http://doi.org/10.21440/2307-2091-2024-1-164-171

Effective management of the mineral resource base of mining enterprises as a factor in the economic security of the country

Sergey Minshakirovich SAL'MANOV*

JSC "Polymetal Management", Saint Petersburg, Russia

Abstract

Relevance. Critically important minerals are the cornerstone of a new round of the industrial revolution and the raw material for almost all sectors of the global economy. In this regard, it is obvious that the mining industry is one of the most important industries in the world and is the basis for stable economic development. The demand for extracted resources will continue to grow in the coming years due to the accelerating scientific and technological process, a growing population and the global transition to low-carbon, but metal-intensive energy production technologies. These trends give every reason to assert that the mineral resource base is one of the key elements of the economic security of the countries of the world.

The purpose of the work is to develop an adaptive and effective management concept for the natural resource extraction sector. This concept should take into account the importance of the mineral resource base for the economic security of the country, should go beyond a simple tool for effective corporate governance, since in the global world, in conditions of increasing dependence between countries, the management system should cover a wide range of stakeholders at different levels.

Methods. General scientific and special methods of scientific cognition were used in the research process, namely: analysis and synthesis, comparison, systematization, generalization, grouping, abstraction.

Results of the work and scope of application. The article identifies the participants in the management contour of the mineral resource base of mining enterprises, formalizes the value chains characteristic of the extractive sector. Special attention is paid to the principles of effective management of the mineral resource base at the mining enterprise level. Using the example of Polymetal, the practical application of the concept of a cluster approach to the management of the mineral resource base is shown. The results obtained can be used by government agencies and private mining and exploration enterprises to improve methods and tools in the field of management of the *mineral resource base.*

Conclusion. Based on the results obtained, the article presents the concept of effective management of the mineral resource base of mining enterprises based on a cluster approach.

***Keywords*:** management, mining enterprise, minerals, raw materials, base, state, ecology, society, participants, market.

REFERENCES

1. Rodin N. S. 2022, Strategic management of the mineral resource base of Russia. *Aktual'nyye issledovaniya* [Current Research], no. 20 (99), pp. 52–55. (*In Russ.*)
2. Melekhin E. S. 2021, Application of design management methods in subsoil use. *Problemy ekonomiki i upravleniya neftegazovym kompleksom* [Problems of economics and management of the oil and gas complex], no. 2 (194), pp. 44–49. (*In Russ.*) https://doi.org/10.33285/1999-6942-2021-2(194)-44-49
3. An L., Jiang X., Liu Z., Li Q. 2023, Socio-economic impact of natural resource management: How environmental degradation affects the quality of life. *Geological Journal*, vol. 58, issue 9, pp. 3310–3325. https://doi.org/10.1002/gj.4787
4. Xu Y. 2023, Financial development, financial inclusion and natural resource management for sustainable development: Empirical evidence from Asia. *Geological Journal*, vol. 58, issue 9, pp. 3288–3300. https://doi.org/10.1002/gj.4825
5. Puliti R. 2017, The Growing Role of Minerals and Metals for a Low Carbon Future. Washington, DC, USA, 92 p. URL: http://hdl.handle.net/10986/28312
6. Eremeeva O. S., Mochalova L. A. 2023, Organizational and economic mechanism of circular subsoil use. *Zhurnal novoy ekonomiki* [Journal of New Economy], vol. 24, no. 1, pp. 104–125. (*In Russ.*) https://doi.org/10.29141/2658-5081-2023-24-1-5
7. Bagataev R. M. 2021, Mineral resource potential as a factor in the economic growth of Dagestan. *UEPS: upravleniye, ekonomika, politika, sotsiologiya* [MEPS: management, economics, politics, sociology], no. 1, pp. 27–35. (*In Russ.*)
8. Puntillo P., Gulluscio C., Huisingh D., Veltri S. 2020, Reevaluating waste as a resource under a circular economy approach from a system perspective: Findings from a case study. *Business Strategy and the Environment*, vol. 30, issue 2, pp. 968–984. https://doi.org/10.1002/bse.2664
9. Batugina N. S. 2023, The role of mineral resources in the economy of the Republic of Sakha (Yakutia). *Mineral'nyye resursy Rossii. Ekonomika i upravleniye* [Mineral Resources of Russia. Economics and Management], no. 4 (183), pp. 41–48. (*In Russ.*)
10. Rebrik M. O. 2022, The influence of the "Chinese economic miracle" on the development of the mineral resource base. *Ekonomika: vchera, segodnya, zavtra* [Economics: yesterday, today, tomorrow], vol. 12, no. 5A, pp. 118–128. (*In Russ.*) https://doi.org/10.34670/AR.2022.47.33.013
11. Elkhan R. S. Z. 2021, Natural resources, technological progress, and economic modernization. *Review of Development Economics,* vol. 25, issue 1, pp. 381–404. https://doi.org/10.1111/rode.12716
12. Yakushina O. I., Pechenkin I. G., Lugovskaya I. G. 2023, Organizational and managerial decisions for the creation of a domestic mineral resource base at the beginning of the twentieth century. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mining information and analytical bulletin], no. 7, pp. 166–179. (*In Russ.*) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_7_0_166
13. Kuzina E. S. 2021, Principles of formation of the structure of mineral resource capital. *Finansovyye rynki i banki* [Financial markets and banks],

✉Salmanov@polymetal.ru

no. 6, pp. 9–12. (*In Russ*.)
14. Albertyan A. P. 2022, Development of the mineral resource complex as an increase in the geopolitical status of Russia. *Mirovaya politika* [Global Politics], no. 1, pp. 48–58. (*In Russ*.) https://doi.org/10.25136/2409-8671.2022.1.37713
15. Rodríguez-López N., Coronado Mondragon A. E. 2023, The impact of supply chain integration from the Service-Dominant Logic perspective: Operant resources and value generation. *European Management Review*, no. 6, pp. 1–17. https://doi.org/10.1111/emre.12566
16. Xiaoman W., Majeed A., Vasbieva D. G., Yameogo C. E. W., Hussain N. 2021, Natural resources abundance, economic globalization, and carbon emissions: Advancing sustainable development agenda. *Sustainable Development*, vol. 29, issue 5, pp. 1037–1048. https://doi.org/10.1002/sd.2192

The article was received on January 23, 2024

УДК 330.34 http://doi.org/10.21440/2307-2091-2024-1-172-181

Современные тенденции управления энергоэффективностью посредством коммуникативного воздействия

Илья Юрьевич ПОЛЕТАЕВ*

АО «Институт региональных экономических исследований (ИРЭИ)», Москва, Россия

Аннотация

Цель и актуальность работы. Целью данного исследования является анализ условий и возможных мероприятий по популяризации энергосбережения и энергоэффективности. Рассмотрены возможности и особенности использования пропаганды в качестве стимулирующего фактора к изменению потребительского поведения по отношению к энергетическим ресурсам и повышению эффективности их использования, что актуально для текущего момента. Было установлено, что для достижения максимального эффекта пропаганды энергоэффективности необходимо учитывать психологические особенности конкретной целевой аудитории.

Методология. Проведен анализ нормативных актов и мероприятий по популяризации энергосбережения и энергоэффективности. Обобщены результаты социологических опросов населения по данному вопросу.

Результаты и область применения. На сегодняшний день в сфере бережного отношения к энергетическим ресурсам остается актуальным проведение таких первоочередных мероприятий, как всестороннее экологическое информирование населения, создание в шаговой доступности для населения мест сбора вторичного сырья, повышение экологической ответственности лично руководителей предприятий и организаций, в том числе управляющих компаний. Важно создать механизмы, стимулирующие вовлечение вторичных ресурсов в хозяйственный оборот, необходимо выстраивать кооперационные цепочки и повышать востребованность вторичных ресурсов. На федеральном и региональном уровне необходимо законодательно предусмотреть материальное стимулирование при одновременном повышении ответственности региональных операторов по обращению с твердыми бытовыми отходами. На региональном уровне необходимо повышение ответственности местных органов исполнительной власти и объединение их усилий по вопросам пропаганды энергосбережения и энергоэффективности с крупнейшими региональными потребителями электрической и тепловой энергии, а также воды (энергетическими компаниями и предприятиями). Материалы работы могут быть использованы в процессе формирования и реализации федеральных и региональных целевых программ в области энергосбережения.

Выводы. Пропаганда является мощнейшим средством изменения как мировоззрения, так и поведения потребителей. Для достижения максимальной эффективности необходимо использовать все возможные способы распространения информации. Решение задачи активизации пропаганды энергосбережения не требует существенных финансовых вложений, следовательно, она должна в обязательном порядке быть включена в перечень мероприятий по повышению энергоэффективности всех организаций как государственного, так и регионального и местного уровня.

***Ключевые слова*:** власть, ресурсы, регион, пропаганда, энергосбережение, энергоэффективность.

Введение

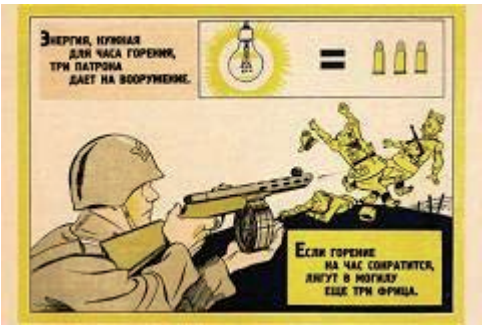
Многие современники необоснованно считают, что тема бережного отношения и эффективного использования энергетических ресурсов в России появилась совсем недавно, лишь во времена Великой Отечественной войны. Это не совсем так.

Содержание исследования и его результаты

Еще в 1879 г. в «Докладе Городской Управы по V отделению № 405» приведен расчет эффективности применения в Санкт-Петербурге электрического освещения по сравнению с газовым. В этом же документе указывается на необходимость применения электропроводящей смазки в приборах электрического освещения [1].

Примерно в 1913 г. в свет выходит труд (2-е издание) инженера В. А. Александрова «Что должен знать каждый имеющий электричество или желающий устроить его у себя. Необходимые сведения для абонентов и лиц, думающих переходить на электричество (освещение, передачу и прочее)». Данная книга была посвящена популяризации и широкому использованию электроэнергии в России. С началом Первой мировой войны 1914–1918 гг. и революции 1917 г. произошло общее ухудшение экономической ситуации в стране, что в конечном итоге привело к резкому росту тарифов на электроэнергию. В связи с этим вышедшее в 1918 г. 3-е издание данной книги получило название

✉poletaev1@gmail.com



«Что нужно знать, чтобы меньше тратить на электричество. Необходимые сведения для абонентов и лиц, думающих переходить на электричество (освещение, передачу и прочее)». М.: Тип. Зеликова, 1918. 92 с. В данной книге популярно объяснено применение и размещение источников света (ламп) разной мощности в зависимости от локальности использования и категории помещения. Также показано преимущество электрического освещения перед керосиновым или газовым, отражена важность применения двойного тарифа (дифференцированного по времени суток) для «наименьшей нагрузки машин (генераторов – *прим. автора*) станции». Книга моментально стала бестселлером и разошлась тиражом 18 000 экземпляров.

После окончания Гражданской войны, в связи с огромными затратами на создание экономики молодого государства и необходимостью всецелой экономии ресурсов, в 1923 г. была издана «Инструкция Госплана СССР областным и губернским экономическим совещаниям по составлению планов электрификации», где была указана необходимость использования имеющихся электростанций на полную нагрузку: «Неполная нагрузка тех или иных электростанций удорожает себестоимость производимой на них энергии» [2].

В годы Великой Отечественной войны ввод в строй эвакуированных предприятий из европейской части России и строительство новых заводов оборонного значения потребовали немедленного создания сети качественного и гарантированного энергоснабжения. Все ресурсы были направлены на обеспечение их бесперебойной работы, на электростанциях и в электросетях было внедрено свыше 15 тысяч предложений изобретателей и рационализаторов [3], обеспечивших значительную экономию электроэнергии, сбережение материалов и проведение высококачественных ремонтов. Именно в годы войны было выпущено большое количество плакатов, призывающих в быту и на производстве экономить электроэнергию.

В мае 1944 г. вышло постановление Государственного Комитета Обороны СССР № 5928 «Об экономии электроэнергии в промышленности», в котором, помимо замечаний в адрес отдельных предприятий, подчеркивалась важность снижения расхода электрической энергии за счет технологических и организационных мероприятий и полной загрузки оборудования, также была

определена равность ответственности должностных лиц предприятий.

После победы в Великой Отечественной войне огромную роль в восстановлении народного хозяйства сыграли энтузиазм трудящихся и всемерная экономия ресурсов. В марте-апреле 1947 г. между инженерно-техническими работниками промышленности началось соревнование за увеличение производительности труда и снижение трудоемкости изделий на основе усовершенствования технологий и внедрения передовых методов работы. Форсированное восстановление советской экономики сопровождалось мощными пропагандистскими кампаниями [4], в результате чего именно самоотверженный труд трудящихся обеспечил скорое восстановление и стремительный рост экономики России в послевоенные годы.

Тема энергосбережения оставалась актуальной и в последующие годы. 4 ноября 1959 г. ЦК КПСС опубликовал письмо «О рациональном использовании электрической энергии в народном хозяйстве» с призывом к «самому экономному расходованию электроэнергии,

рассматривая снижение ее расходов как задачу "огромного общегосударственного значения"». Была отражена необходимость сосредоточить внимание на строгом соблюдении технологической дисциплины на производстве, обеспечении наивыгоднейших режимов работы технологического и энергетического оборудования, содержании в исправном состоянии агрегатов, электроустановок, осветительных приборов и коммуникаций. В письме особо подчеркивалось, что речь идет не о сокращении разумного потребления электроэнергии, а о том, «чтобы расходовать электроэнергию бережно, экономно, действительно по-хозяйски». Согласно данному письму, все средства массово-политической и воспитательной работы были направлены на повышение ответственности всех работников за правильное расходование энергии.

Через пять лет Постановлением Совета Министров СССР от 28.11.1964 «Об экономном расходовании в народном хозяйстве электрической и тепловой энергии и топлива» была вновь подтверждена необходимость участия трудящихся в обсуждении и решении «вопросов экономного расходования электрической и тепловой энергии, а также других видов топливно-энергетических ресурсов» которые «приобретают особо важное народнохозяйственное значение».

После 1980 г. к экономии энергии было привлечено и население. Начали использоваться новые способы пропаганды для воздействия на сознание людей и обучения их действиям по экономному отношению к потребляемым ресурсам, в первую очередь – на детей. На экраны телевидения вышли мультфильм «Берегите воду» 1982 г. [5] и мультфильмы «Берегите тепло» – 1986 и 1988 гг. [6, 7], в которых наглядно демонстрировались меры по экономии ресурсов. Следует отметить, что идея создания и демонстрации мультфильмов для воспитания подрастающего поколения, так как дети легко обучаемы в игровой форме, актуальна и сегодня – с сентября 2014 г. в качестве эксперимента в 90 школах Москвы школьникам решено показывать на уроках интерактивные мультфильмы про энергосбережение [8].

Вопросы бережного и эффективного использования энергетических ресурсов остаются одними из ключевых аспектов развития общества. Мероприятия по повышению энергоэффективности уменьшают объем потребляемых энергетических ресурсов и выбросы парниковых газов, одновременно снижая нагрузку на линии передач и снижая затраты конечных потребителей.

С целью выполнения задач по повышению эффективности использования энергетических ресурсов был принят Федеральный закон от 23.11.2009 № 261-ФЗ и была утверждена Государственная программа Российской Федерации «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности на период до 2020 года». В течение последующих лет подходы к вопросу повышения энергоэффективности в России неоднократно менялись, в результате чего указанная Программа претерпела множество корректировок.

В октябре 2021 г. по поручению Президента РФ Правительство начало работу над актуализацией новой государственной программы, и в сентябре 2023 г. постановлением Правительства РФ от 09.09.2023 № 1473 была утверждена комплексная государственная Программа Российской Федерации «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности».

К сожалению, данный документ носит исключительно декларативный характер, так как помимо перечисления

проблем и задач, стоящих перед Российской экономикой в сфере повышения энергоэффективности, не содержит конкретных мероприятий по их решению и конкретных количественных показателей (ориентиров).

Хотелось бы напомнить, что государственной программой Российской Федерации является документ стратегического планирования, содержащий комплекс планируемых мероприятий, взаимоувязанных по задачам, срокам осуществления, исполнителям и ресурсам, и инструментов государственной политики, обеспечивающих в рамках реализации ключевых государственных функций достижение приоритетов и целей государственной политики в сфере социально-экономического развития и обеспечения национальной безопасности Российской Федерации. Таким образом, утвержденный постановлением Правительства РФ от 09.09.2023 № 1473 документ в его настоящем виде не может являться государственной программой [9].

Вторичные ресурсы. Переработка вторичных ресурсов позволяет существенно сократить затраты энергии на их добычу, что актуально и на сегодняшний день.

В каждом предмете вокруг нас существует «овеществленная» энергия, т. е. та, которая уже была израсходована для получения материала и изготовления некоего товара, обладающего определенными потребительскими функциями. С течением времени, по мере утраты товаром потребительских свойств и в связи с негодностью для дальнейшего использования, потребитель (предприятие, организация, население) вынужден приобретать новые товары взамен вышедших из строя.

Национальным проектом «Экология» предусмотрено эффективное обращение с отходами производства и потребления, Федеральным законом от 24.06.1998 № 89-ФЗ «Об отходах производства и потребления» определено, что отходы или части которых могут быть повторно использованы для производства товаров, выполнения работ, оказания услуг или получения энергии (вторичные ресурсы), подлежат утилизации и их захоронение не допускается. Данный Федеральный закон определяет приоритетные направления государственной политики в области обращения с отходами: максимальное использование исходных сырья и материалов и сокращение образования отходов. В нем также отражены обязанности физических и юридических лиц по сбору и утилизации отходов производства и потребления. Переработка отходов не только позволит сократить использование природных и энергетических ресурсов, но и даст им шанс на вторую жизнь, но уже в виде других, новых товаров.

Распоряжением Правительства РФ от 31.12.2020 № 3721-р «О перечне товаров, подлежащих утилизации после утраты ими потребительских свойств и перечне упаковки товаров, подлежащей утилизации после утраты ею потребительских свойств» определен перечень продукции, подлежащей утилизации после утраты потребительских свойств. Помимо металлических изделий и предметов, содержащих драгоценные металлы (в первую очередь, бытовая и промышленная электроника и компьютерное оборудование) в данный перечень включены резино-технические изделия (шины, шланги и пр.), продукция из текстиля, дерева, картона и бумаги, пластика (пластмассы), батарейки (аккумуляторы и т. п.), стекло и нефтепродукты.

Вторичная переработка (утилизация) позволяет существенно сэкономить энергию, поскольку перерабатываемые продукты обычно требуют гораздо меньшей обработки, чтобы превратить их в пригодные для использования материалы для изготовления новых продуктов. Помимо этого утилизация отходов поможет людям избавиться от еще одной проблемы глобального масштаба – мусора.

Тем не менее по настоящее время в России большинство содержащихся в упомянутых перечнях изделий поступает не на переработку, а на полигоны складирования твердых бытовых отходов. Согласно статистике Российского экологического оператора, в переработку поступают лишь 5 % электронного и электрического оборудования, не более 15 % старых шин, всего 7 % пластика. При этом в 2021 г. Минприроды сообщало, что в России 80 заводов по переработке пластика функционируют лишь на 60 % из-за нехватки сырья. Помимо необходимости вывоза автомобильных шин на специализированное предприятие за их сдачу на переработку бывший владелец обязан заплатить из своего кармана от 190 рублей для легковых до 680 рублей для грузовых шин (в ценах 2022 г. за комплект из четырех шин).

Таким образом, причинами низкой собираемости сортируемых отходов у населения являются отсутствие морального и экономического стимулов к раздельному сбору отходов, а также отсутствие в шаговой доступности пунктов приема отходов. Для юридических лиц проведение мероприятий по сбору вторичных ресурсов – это, в первую очередь, отсутствие экономической заинтересованности.

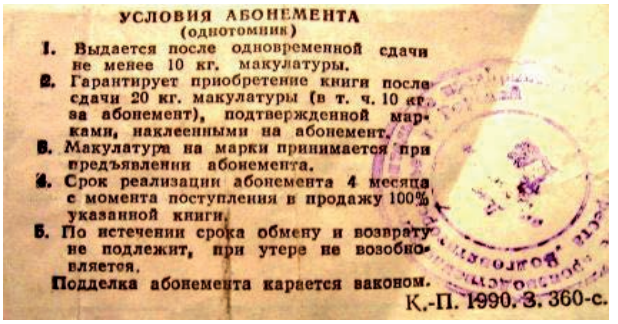
Помимо нанесения вреда окружающей среде занимающими огромные территории полигонами складирования твердых бытовых и промышленных отходов затраченная на их производство энергия в прямом смысле слова выбрасывается на свалку, что не способствует выполнению задачи снижения энергоемкости валового внутреннего продукта Российской Федерации [10].

На федеральном и региональном уровне необходимо законодательно предусмотреть материальное стимулирование при одновременном повышении ответственности региональных операторов по обращению с твердыми бытовыми отходами за своевременность и полноту их сбора и утилизацию.

Эпоха СССР характеризовалась активным сбором вторичных ресурсов, в том числе практиковали раздельный сбор вторсырья. Нехватка бумаги привела к активизации работы по сбору макулатуры. За 20 кг сданной населением макулатуры «позволялось» купить одну дефицитную книгу.

Вопрос сбора макулатуры актуален и в наше время в связи с ростом потребления бумаги. При этом перерабатывать бумагу можно около шести раз, в результате одна тонна макулатуры может спасти 17 взрослых деревьев [11].

Также активно пропагандировали сбор металлолома. Утверждалось, что это не просто мероприятие, а дело государственной важности. Причем дело почетное и азартное. Многие организации, а в особенности школы, организовывали такие мероприятия по нескольку раз в год



(как правило, зимой и осенью) как конкурс, по результатам которого проводились награждения лучших. Соревнования проводились и между школами. В 1960 г. на тему металлолома был снят мультфильм «Железные друзья» [12]. После 1971 г. металлолом в мультфильме «Крокодил Гена» собирали Чебурашка с Геной.

Кроме пунктов по сбору макулатуры и металла повсеместно были распространены и киоски для приема стеклянных бутылок. Их для удобства открывали в непосредственной близости от продуктовых магазинов. При этом иное «вторичное» стекло (битые бутылки, оконные стекла, зеркала и т. п.) сдать в эти пункты было невозможно, оно просто выбрасывалось.

Пропаганда экономии и сбора вторичных ресурсов проявлялась в размещении наглядной агитации не только на плакатах, но и на спичечных коробках, наиболее популярных и доступных (по цене 1 коп.) среди населения. Спичками пользовались ежедневно, по несколько раз в

день. Понятно, что такое размещение существенным образом влияло на мышление населения. Согласно статистике, потребление спичек на душу населения составляло в 1930 г. 48 коробков [13], в 1941 г. – 56 коробков [14], к концу XX в. – 75 коробков [15]. Некоторые примеры приведены далее. Популярны спичечные коробки и в наше время.

Результаты

На сегодняшний день тема эффективного использования энергетических ресурсов по-прежнему рассматривается как важнейший элемент обеспечения устойчивого роста реального сектора экономики, развития большинства отраслей топливно-энергетического комплекса (электроэнергетики, нефтяной и газовой отраслей, угольной промышленности, возобновляемых источников энергии), промышленности, транспорта, жилищно-коммунального хозяйства. При этом разъяснительная работа с населением и сотрудниками организаций по необходимости и способам энергосбережения будет способствовать повышению образованности населения и стимулировать их энергоэффективное поведение на работе и в быту.

К сожалению, в настоящее время пропаганда бережного отношения к энергетическим и природным ресурсам практически не ведется. Так, если по исследованию ВЦИОМ 2015 г. (были опрошены 1,6 тыс. человек), за расходами энергоресурсов с особой тщательностью следило меньше половины россиян (46 %), то уже в 2019 г. их количество выросло, но составило всего 57 % [16, 17]. Это в первую очередь люди, стремящиеся к экономии денежных средств (82 % и 79 % соответственно), и существенно реже те, кому были привиты соответствующие нормы в процессе воспитания (большей частью, люди старшего и среднего возраста) или те, кто исходит из принципов заботы о природе. Сильнее вопрос экономии волнует проживающих в малых городах с населением до 100 тыс. человек и жителей сел и деревень.

По результатам опроса, проведенного ВЦИОМ в мае 2021 г., в ходе которого были также опрошены 1,6 тыс. человек на всей территории России, только 11 % респондентов уверены, что хорошо понимают, что такое энергоэффективность жилья, а 42 % лишь что-то слышали об этом понятии, 47 % опрошенных признались, что ничего не знают о такой характеристике жилья, как энергоэффективность [18].

Согласно ноябрьскому (2023 г.) опросу ВЦИОМ, за 10 лет (по сравнению с 2013 г., количество россиян, которые экономят электричество, **снизилось** и составило

58 % (в 2013 году – 60 %). При этом, если десять лет назад финансовый мотив был определяющим – 56 %, то сегодня его называют 37 %, т. е. в полтора раза реже. Выросла доля тех, для кого экономия электричества – семейная привычка (37 %, +6 п. п. к 2013 г.), и в два раза вырос процент россиян, следящих за потреблением электричества во благо планеты (2013 г. – 9 %, 2023 г. – 17 %) [19]. Иначе говоря, за десять лет в сознании россиян помимо финансового мотива появляются привычные действия и экологическое осознание в вопросах экономии электроэнергии.

По мнению автора, уже сегодня необходимо активизировать пропаганду, в особенности наглядную агитацию, экономии энергетических ресурсов и их рационального использования для всех уровней потребителей и в первую очередь – для населения.

В общих словах, **пропаганда** как вид коммуникативного воздействия – это массовое распространение информации с целью формирования нужного общественного мнения и норм поведения, и управления большим количеством людей для достижения заранее поставленных целей. При этом первоначальная цель пропаганды обычно не скрывается [20]. Объектом воздействия пропаганды является сознание и поведение человека, его образ мышления, идеологические и социальные устои. В случае энергосбережения пропаганда должна формировать положительный образ выгоды потребителя как результат приложенных им усилий. При этом пропаганда является еще и наименее затратным мероприятием по популяризации энергосбережения.

Пропаганда является мощнейшим средством изменения как мировоззрения, так и поведения потребителей. Для достижения максимальной эффективности необходимо использовать все возможные способы распространения информации: телевидение, радио, Интернет, печатная продукция. При этом необходимо учитывать не только интересы определенной группы потребителей (рабочие, ИТР, домохозяйки, бизнесмены и т. п.), но и вероятную скорость восприятия информации. К примеру, такая печатная продукция, как флаеры (листовки), могут раздаваться и (или) быть в свободном доступе в местах интенсивного движения людей – метро, магазины etc.; буклеты – на выставках, в кафе и остановках общественного транспорта, брошюры – в местах длительного пребывания людей – железнодорожные вокзалы и автовокзалы, вагоны поездов, отели, лечебные учреждения etc. Информация на билбордах вдоль автодорог должна, по причине кратковременности визуального восприятия, содержать лишь краткий призыв к действию типа «Берегите энергию!»

Пропаганда бережного отношения к потребляемым ресурсам должна быть направлена на все группы потребителей, начиная с органов исполнительной власти, управляющих компаний, учреждений образования и т. п., и заканчивая бытовыми потребителями (населением). Безусловно, необходимо учитывать интересы целевой аудитории. Если в регионах объектом пропаганды является население, то для отдельной организации таковым могут являться ее сотрудники (работники), клиенты (физические лица и предприятия), население, проживающее в регионе деятельности.

При этом с учетом традиционно сложившегося в России отношения населения к энергетическим ресурсам как к легкодоступным и неограниченным пропаганда энергосбережения не должна восприниматься человеком, как призыв к ограничению и ухудшению качества жизни. Необходимо решить первоочередную задачу по изменению мировоззрения потребителя ресурсов и «создать привычку задумываться о последствиях простых и привычных действий каждого человека, таким образом сделать энергосбережение осознанным выбором» [21].

Пропаганда энергоэффективности должна привлекать внимание, быть понятной, краткой, логичной, четко выраженной, стимулирующей и повторяемой. Определяемая цель должна соответствовать интересам (выгоде или значимости) целевой аудитории. Выбор способа информирования (наглядная агитация, средства массовой информации, разнообразные IT-технологии, форумы и конференции и т. п.) должен определяться в зависимости от целевой аудитории. Появление развлекательного элемента в самых официальных событиях также способствует единению участников мероприятий. Проведение массовых мероприятий (фестивали, конкурсы и т. п.) с награждением участников будет способствовать увеличению числа сторонников бережного отношения к потребляемой энергии.

Современность диктует необходимость широкого использования таких интернет-технологий, как всплывающая реклама на сайтах, вебинары и т. п. Использование современных мультимедийных решений значительно повышает количество и уровень включенности участников.

Современный уровень обеспечения населения компьютерами и «умными» гаджетами типа смартфонов определяют возможность и необходимость создания компьютерных игр по энергоэффективности, повышающих чувство ответственности за бережливое отношение и эффективность использования энергоресурсов. Несколько таких игр уже было создано – в первую очередь, это «Моя энергия» и «ЖЭКА», но, к сожалению, на сегодняшний день функциональность «ЖЭКА» по неизвестным причинам приостановлена [22], а интерфейс игры «Моя энергия» оставляет желать лучшего.

Решение задачи активизации пропаганды не требует существенных финансовых вложений, следовательно, задача должна в обязательном порядке быть включена в перечень мероприятий по повышению энергоэффективности всех организаций как государственного, так и регионального и местного уровня. На региональном уровне необходимо объединение усилий по пропаганде энергосбережения и энергоэффективности с крупнейшими энергетическими компаниями и предприятиями – крупнейшими региональными потребителями электрической и тепловой энергии, а также воды. Силами региональных органов исполнительной власти необходимо организовать стимулирование и награждение предприятий и организаций, реализовавших успешные проекты в области энергосбережения и повышения энергоэффективности.

Выводы

На сегодняшний день тема эффективного использования энергетических ресурсов по-прежнему рассматривается как важнейший элемент обеспечения устойчивого роста экономики России.

Необходимо срочно активизировать пропаганду, в особенности наглядную агитацию, рационального использования и экономии энергетических ресурсов для всех уровней потребителей, как наименее затратный способ воздействия на поведение населения. Пропаганда бережного отношения к потребляемым ресурсам должна быть направлена на все группы потребителей, быть понятной, краткой, логичной, четко выраженной, стимулирующей и повторяемой.

Проведение массовых мероприятий, сочетающих игровую, конкурсную и информационную составляющую (фестивали, конкурсы и т. п.) с награждением участников, будет способствовать увеличению числа сторонников бережного отношения к потребляемой энергии.

Решение задачи активизации пропаганды не требует существенных финансовых вложений, следовательно, задача должна в обязательном порядке быть включена в перечень мероприятий по повышению энергоэффективности всех организаций как государственного, так и регионального и местного уровня.

На региональном уровне необходимо объединение усилий по пропаганде энергосбережения и энергоэффективности с крупнейшими энергетическими компаниями и предприятиями – крупнейшими региональными потребителями электрической и тепловой энергии, а также воды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Электрическое освещение моста Императора Александра II в г. С.-Петербурге // Электричество. 1880. № 2. С. 24.
2. Инструкция Госплана СССР областным и губернским экономическим совещаниям по составлению планов электрификации от 10.05.1923 // Развитие электрификации Советской страны 1921–1925 гг.: сборник. М.: Госполитиздат, 1956. С. 368–373.
3. ЦГАНХ СССР, ф. 7964, оп. 2. д. 91 (2), л. 213.
4. Винник Д. В., Комаров А. В. Энтузиазм трудящихся как фактор экономического роста СССР после Великой Отечественной войны в 1945–1953 года // Инновационная наука. 2016. № 3. Ч. 1. С. 39–43.
5. Яндекс Видео. URL: https://yandex.ru/video/preview/13776973725457431612
6. Одноклассники Видео. URL: https://ok.ru/video/2122669230633
7. Яндекс Видео. URL: https://yandex.ru/video/preview/8955862663321879997
8. Москва 24. Герои мультфильмов научат школьников экономить электричество. URL: https://www.m24.ru/articles/ehkologiya/06082014/52254
9. Полетаев И. Ю. Государственная программа по энергоэффективности 2023 г. – возможность реализации // Техсовет Премиум. 2023. № 11/12 (222). С. 42–43.
10. Полетаев И. Ю. Вторичные ресурсы и энергоэффективность промышленного сектора // Техсовет Премиум. 2023. № 5/6(219). С. 40–42.
11. Мамонова Е. Использование макулатуры поможет сохранить деревья и снизит уровень антропогенной нагрузки // Российская газета. Спецвыпуск: Экология. 2023. № 121(9066). URL: https://rg.ru/2023/06/05/makulatura-spasaet-les.html
12. VK видео. URL: https://vk.com/video-135285_456241047
13. Андреев Б. СССР на первом месте. URL: https://litbit.ru/ru/andreev-boris/spichke-sto-let/sssr-na-pervom-meste
14. Светлов А. На Дальнем Востоке сэкономили на спичках. URL: http://debri-dv.com/article/11304/na_dalnem_vostoke_sekonomili_na_spichkah
15. ЛесПромИнформ. URL: https://lesprominform.ru/jarticles.html?id=1438
16. Энергоэффективность и экономичное потребление ресурсов: кто «в теме»? URL: https://wciom.ru/analytical-reviews/analiticheskii-obzor/energoeffektivnost-i-ekonomichnoe-potreblenie-resursov-kto-v-teme?ysclid=lrvv8sh4h0603707169
17. Каждый второй житель страны экономит на газе и электричестве. URL: https://wciom.ru/analytical-reviews/analiticheskii-obzor/energoeffektivnoe-povedenie-rossiyan-monitoring
18. Отношение россиян к энергоэффективному жилью. Социологический опрос российских семей // ВЦИОМ. 2022. 7 с.
19. ВЦИОМ. Энергосбережение: мониторинг. URL: https://wciom.ru/analytical-reviews/analiticheskii-obzor/ehnergosberezhenie-monitoring?ysclid=lrvvmfdtcw744933329
20. Википедия. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Пропаганда
21. Методические рекомендации по пропаганде и популяризации энергосбережения в бюджетной сфере / под ред. Е. Е. Кузьминой. М.: НИТУ МИСиС, 2014. 32 с.
22. ЖЭКА. URL: https://igra-jeka.ru/?ysclid=llc6393t9817598938

Статья поступила в редакцию 16 августа 2023 года

UDC 330.34 http://doi.org/10.21440/2307-2091-2024-1-172-181

Modern trends in energy efficiency management through communicative influence

Ilya Yur'evich POLETAEV*

JSC "Institute of Regional Economic Research (IRER)", Moscow, Russia

Abstract

The purpose and relevance of the work. The purpose of this study is to analyze the conditions and possible measures to popularize energy saving and energy efficiency. The possibilities and features of using propaganda as a stimulating factor for changing consumer behavior in relation to energy resources and increasing the efficiency of their use, which is relevant for the current moment, are considered. It was found that in order to achieve maximum effect in promoting energy efficiency, it is necessary to take into account the psychological characteristics of a specific target audience.
Methodology. An analysis of regulations and measures to popularize energy saving and energy efficiency was carried out. The results of sociological surveys of the population on this issue are summarized.
Results and scope. Today, in the field of caring for energy resources, it remains relevant to carry out such priority measures as comprehensive environmental awareness of the population, the creation of places for collecting secondary raw materials within walking distance for the population, and increasing the environmental responsibility of the personal heads of enterprises and organizations, including management companies. It is important to create mechanisms that stimulate the involvement of secondary resources in economic circulation; it is necessary to build cooperation chains and increase the demand for secondary resources. At the federal and regional levels, it is necessary to legislatively provide for material incentives while simultaneously increasing the responsibility of regional operators for the management of solid household waste. At the regional level, it is necessary to increase the responsibility of local executive authorities and combine their efforts on issues of promoting energy saving and energy efficiency with the largest regional consumers of electrical and thermal energy, as well as water (energy companies and enterprises). The materials of the work can be used in the process of formation and implementation of federal and regional target programs in the field of energy saving.
Conclusions. Propaganda is a powerful means of changing both worldview and consumer behavior. To achieve maximum effectiveness, it is necessary to use all possible methods of disseminating information. Solving the problem of intensifying the promotion of energy saving does not require significant financial investments; therefore, it must be included in the list of measures to improve energy efficiency of all organizations at the state, regional and local levels.

***Keywords*:** power, resources, region, propaganda, energy saving, energy efficiency.

REFERENCES

1. 1880, Electric lighting of the Emperor Alexander II Bridge in St. Petersburg. *Elektrichestvo* [Electricity], no. 2, p. 24.
2. 1956, Instruction of the USSR State Planning Committee to regional and provincial economic meetings on drawing up electrification plans dated 05/10/1923. The development of electrification of the Soviet country 1921–1925: The collection. Moscow, pp. 368–373.
3. The Central State Archive of the National Economy of the USSR, f. 7964, r. 2. c. 91 (2), p. 213.
4. Vinnik D. V., Komarov A. V. 2016, The enthusiasm of workers as a factor in the economic growth of the USSR after the Great Patriotic War in 1945–1953. *Innovatsionnaya nauka* [Innovation science], no. 3, part 1, pp. 39–43.
5. Yandex Video. URL: https://yandex.ru/video/preview/13776973725457431612
6. OK Videos. URL: https://ok.ru/video/2122669230633.
7. Yandex Video. URL: https://yandex.ru/video/preview/8955862663321879997
8. Moscow 24. Cartoon characters will teach schoolchildren how to save electricity. URL: https://www.m24.ru/articles/ehkologiya/06082014/52254
9. Poletaev I. Yu. 2023, The State Energy Efficiency Program 2023 – the possibility of implementation. *Tekhsovet Premium* [Premium Technical Council], no. 11/12(222), pp. 42–43.
10. Poletaev I. Yu. 2023, Secondary resources and energy efficiency of the industrial sector. *Premium* [Premium Technical Council], no. 5/6(219), pp. 40–42.
11. Mamonova E. 2023, The use of waste paper will help to preserve trees and reduce the level of anthropogenic stress. *Rossiyskaya gazeta* [Russian newspaper]. Special issue: Ecology, no. 121(9066). URL: https://rg.ru/2023/06/05/makulatura-spasaet-les.html
12. VK video. URL: https://vk.com/video-135285_456241047
13. Andreev B. The USSR is in the first place. URL: https://litbit.ru/ru/andreev-boris/spichke-sto-let/sssr-na-pervom-meste
14. Svetlov A. In the Far East, they saved on matches. URL: http://debri-dv.com/article/11304/na_dalnem_vostoke_sekonomili_na_spichkah
15. LesPromInform. URL: https://lesprominform.ru/jarticles.html?id=1438
16. Energy efficiency and economical consumption of resources: who is «in the topic»? URL: https://wciom.ru/analytical-reviews/analiticheskii-obzor/energoeffektivnost-i-ekonomichnoe-potreblenie-resursov-kto-v-teme?ysclid=lrvv8sh4h0603707169

✉poletaev1@gmail.com

17. Every second resident of the country saves on gas and electricity. URL: https://www.energovector.com/portrait-holodnyy-uchet.html?ysclid=lrvv95dt4n505593701
18. 2022, The attitude of Russians towards energy-efficient housing. Sociological survey of Russian families. VCIOM, 7 p.
19. VCIOM. Energy saving: monitoring. URL: https://wciom.ru/analytical-reviews/analiticheskii-obzor/ehnergosberezhenie-monitoring?ysclid=lrvvmfdtcw744933329
20. Wikipedia. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Пропаганда
21. 2014, Methodological recommendations for the promotion and popularization of energy saving in the public sector. Edited by E. E. Kuzmina. Moscow, 32 p.
22. The JEKA. URL: https://igra-jeka.ru/?ysclid=llc6393t9817598938

The article was received on August 16, 2023

История горного дела

http://doi.org/10.21440/2307-2091-2024-1-182-192

Аркадий Константинович Подногин (1898–1961) и бывший подногинит (ныне кальциооливин)

Arkadiy Konstantinovich Podnogin (1898–1961) and former podnoginite (now calcio-olivine)

Юрий Викторович ЕРОХИН[1]*
Людмила Михайловна ЕВДОКИМОВА[2]
Александр Георгиевич ШОРИН[3]**

[1]Институт геологии и геохимии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия
[2]Муниципальное автономное общеобразовательное учреждение средняя общеобразовательная школа № 48, г. Екатеринбург, Россия
[3]Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия

*erokhin-yu@yandex.ru
**sandy_blood@mail.ru

Yuriy Viktorovich EROKHIN[1]*
Lyudmila Mikhailovna EVDOKIMOVA[2]
Aleksandr Georgievich SHORIN[3]**

[1]The Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russia
[2]Municipal Autonomous General Education Institution Secondary General Education School no. 48, Ekaterinburg, Russia
[3]Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia

*erokhin-yu@yandex.ru
**sandy_blood@mail.ru

Аннотация
Аркадий Константинович Подногин – крупный уральский специалист в области кристаллографии и петрографии. Автор первых уральских учебников для определения минералов по методу Е. С. Федорова. Он проработал в Свердловском горном институте с 1922 по 1961 г. и последовательно являлся лаборантом, ассистентом, доцентом, а также был заведующим кафедрой петрографии. Он подготовил тысячи дипломированных специалистов геологического профиля. В честь Аркадия Константиновича был назван новый минерал – подногинит, который был обнаружен Б. В. Чесноковым в горелых отвалах Челябинского угольного бассейна. Международная минералогическая ассоциация не утвердила его в качестве нового минерального вида, а спустя некоторое время был найден природный аналог подногинита – кальциооливин.

Ключевые слова: А. К. Подногин, биография, подногинит, кальциооливин, минералогия, Челябинский угольный бассейн.

Abstract
Arkadiy Konstantinovich Podnogin is a prominent Ural specialist in the field of crystallography and petrography. Author of the first Ural textbooks for determining minerals using the method of E. S. Fedorov. He worked at the Sverdlovsk Mining Institute from 1922 to 1961 and was successively a laboratory assistant, assistant professor, and associate professor, and was also the head of the department of petrography. He trained thousands of certified geological specialists. In honor of Arkadiy Konstantinovich, a new mineral was named – podnoginite, which was discovered by B. V. Chesnokov in the burnt dumps of the Chelyabinsk coal basin. The International Mineralogical Association did not approve it as a new mineral species, and after some time a natural analogue of podnoginite was found – calcio-olivine.

Keywords: A. K. Podnogin, biography, podnoginite, calcio-olivine, mineralogy, Chelyabinsk coal basin.

Аркадий Константинович Подногин – крупный уральский специалист в области кристаллографии и петрографии (фото 1). Автор первых уральских учебников для определения минералов по методу Е. С. Федорова и знаток минералогии технического камня. Он проработал в Свердловском горном институте с 1922 по 1961 г. и последовательно являлся лаборантом, ассистентом, доцентом, а также был заведующим кафедрой петрографии. Он подготовил тысячи дипломированных специалистов геологического профиля.

Об Аркадии Константиновиче даны только краткие сведения в открытой литературе [1–4], поэтому авторы постарались дать полную биографию преподавателя и ученого.

Аркадий Константинович Подногин родился 19 сентября 1898 г. в селе Голюшурма Варзи-Ятчинской волости

Фото 1. Аркадий Константинович Подногин. 1947 г. Из архива УГГУ

Елабужского уезда Вятской губернии (ныне юг Удмуртии), близ слияния рек Кама и Иж. Его отец Константин Иванович Подногин с юношеских лет работал на Ижевском заводе в кузнечном цехе, а последние 30 лет своей жизни – на Голюшурминском винокуренном заводе, где дослужился до заведующего конным двором и складом завода. В революционный 1917 г. он был председателем Фабрично-Заводского Рабочего Комитета. После Октябрьской революции его избрали во Временный Совет по управлению предприятиями купца И. Г. Стахеева, которому в том числе и принадлежал винокуренный завод в Голюшурме. После передачи предприятий в Высший Совет Народного Хозяйства РСФСР К. И. Подногин с октября 1918 г. был назначен заведующим мясо-хлебофуражным пунктом Елабужского упродкома на Голюшурминском заводе. К сожалению, 22 апреля 1919 г. его как красного комиссара здесь же на заводе расстреляли колчаковские войска. Про мать юного Аркадия нам ничего не известно, но у него были две сестры – Наталия и его близняшка Антонина.

Аркадий к 1917 г. окончил двухклассную школу и 7 классов реального училища г. Мензелинска. Уже бушевала Первая мировая война, и 1 октября его призвали в Русскую императорскую армию и зачислили писарем штаба 230 пехотного запасного полка, расположенного в г. Елабуге. В ноябре революционные власти распустили армию, но Аркадий остался при службе до ликвидации дел полка. Таким образом, он числился с 7 ноября 1917 г. по 1 мая 1918 г. полковым писарем в Красной армии (или РККА).

После демобилизации Аркадий вернулся в родное село, а уже в сентябре 1918 г. стал преподавателем математики, химии и физики в Высшем начальном училище в г. Елабуге, потом переименованном в Советскую школу II ступени им. К. Маркса. Жил Аркадий прямо в школе. В свободное время, будучи «самоучкой», рисовал и учился игре на фортепиано, самостоятельно изучив нотную грамоту.

На период кратковременной оккупации Елабужского района колчаковскими войсками с апреля по июнь 1919 г. он эвакуировался вместе с частями Красной армии за р. Вятку. В школе Аркадий дослужился до должности директора, но преподавать не бросил. Интересно, что 1 сентября 1921 г. он был срочно командирован Елабужским отделом народного образования в Уральский государственный университет для продолжения образования. С этим связана семейная легенда о том, что как-то нагрянула в школу, где директорствовал Аркадий, комиссия во главе с министром образования Н. К. Крупской. Посмотрели они, как уроки ведутся и дела обстоят, пообсуждали и ждать велели, правда, Аркадий и не догадывался, чего ждать. А через некоторое время на имя А. К. Подногина пришло направление на продолжение учебы в вузе в г. Екатеринбурге.

После конкурсных испытаний Аркадий Константинович был зачислен 15 сентября 1921 г. студентом Геологоразведочного отделения Горного факультета. Обучался он у известных профессоров – А. В. Шубникова, К. К. Матвеева, П. И. Преображенского, Ф. И. Кандыкина (фото 2) и других. С декабря 1922 г. он, не прекращая учебы, стал бесплатно работать лаборантом у профессора А. В. Шубникова при кристаллографическом кабинете. При этом сам Алексей Васильевич выделял А. К. Подногина и передал ему все необходимые знания в области кристаллографии. Тогда же студенты устроили Аркадию Константиновичу первое испытание. Принесли кристалл белого цвета и попросили молодого преподавателя определить, какой это минерал, который они якобы нашли на

Фото 2. Группа студентов и преподавателей-геологов. 1924 г. Из архива Л. М. Евдокимовой (внучки А. К. Подногина). В центре сидит доцент Ф. И. Кандыкин, ниже, через одного, – Аркадий Константинович

Фото 3. Группа студентов и преподавателей в петрографическом кабинете. 1926 г. Из [4]. Персоналии (слева направо): 1-й ряд, нижний (сидят за столом) – И. И. Бок, Д. К. Суслов, А. К. Подногин, проф. Н. И. Безбородько, С. П. Колодкин, М. И. Гарань, С. В. Горюнов, Левкович, М. И. Меркулов; 2-й ряд – А. П. Сигов, Н. И. Кудрина, Е. Медведева, М. А. Коган, К. Е. Кожевников, Н. В. Бутырин, А. Е. Малахов, Ф. И. Рукавишников, П. И. Кутюхин

Фото 4. Аркадий Константинович Подногин – доцент Свердловского горного института. 1930 г. Из архива Л. М. Евдокимовой

лужайке возле Каменных палаток. Посмотрел Аркадий Константинович и невозмутимо сказал: «А это кристалл сахара, выращенный опытным путем почти в идеальных условиях. Молодцы, ребята, сколько дней выращивали?». Этим он очень удивил и обрадовал студентов.

В марте 1925 г. после отъезда А. В. Шубникова в Академию наук Аркадий Константинович по приглашению профессора К. К. Матвеева перешел на оплачиваемую должность препаратора при кафедре минералогии и кристаллографии. По другим данным, К. К. Матвеев «прихватизировал» кристаллографический кабинет и пытался сам читать лекции по кристаллографии, но вскоре это ему наскучило, и на работу был принят А. К. Подногин [3]. На кафедре Аркадий Константинович стал читать лекции и вести практические занятия со студентами по геометрической кристаллографии и кристаллооптике, фактически выполняя обязанности ассистента (фото 3). В 1927 г. он остался препаратором исключительно на кафедре кристаллографии под руководством доцента А. П. Смолина и продолжал вести те же самые занятия.

В 1928 г. Аркадий Константинович написал учебное пособие «Федоровский универсальный метод», а 1 октября этого же года его назначили на должность младшего ассистента на кафедре кристаллографии. 15 декабря 1929 г. он окончил учебу в Уральском политехническом институте, получив квалификацию горного инженера. За время студенчества Аркадий Константинович проходил летние практики (или фактически работал) на золотоплатиновых приисках Исовского района и на Гумбейских золотых рудниках.

Вскоре после защиты диплома, 1 мая 1930 г., А. К. Подногин был переведен в ассистенты, а 1 октября 1930 г. уже назначен и. о. доцента при кафедре кристаллографии. Такой необычно быстрый карьерный рост объясняется просто. Весной 1930 г. в результате реформы высшего образования огромный УПИ был разделен на 10 отдельных вузов, в том числе был выделен и Свердловский горный институт. По всей видимости, в результате такого мелкого дробления в вузах возник дефицит преподавательских кадров, поэтому Аркадий Константинович за короткое время сразу оказался в должности доцента (фото 4).

В 1931 г. его по совместительству назначили помощником заведующего по специальности геология и разведка металлических полезных ископаемых, которым тогда стал Ф. И. Рукавишников. В 1932–1933 гг. Аркадий Константинович был техническим, а потом и научным руководителем Дегтярской геологоразведочной партии, которая занималась одноименным медноколчеданным месторождением (фото 5). В 1933 г. он назначен штатным

Фото 5. Аркадий Константинович на Дегтярском месторождении (отдых после работы). 1933 г. Из архива Л. М. Евдокимовой

Фото 6. Уральские геологи. Нижний ряд, слева направо: первый – Г. С. Муратов, третий – С. А. Кашин, четвертый – П. Я. Ярутин (обогатитель), пятый – А. К. Подногин. Примерно 1940-е гг. Из [5]

доцентом кафедры петрографии и официально утвержден в этом звании. Аркадий Константинович, читая лекции, старался быть интересным, и чтобы студенты лучше запоминали свойства минералов, он использовал песни. Так, когда говорил о том, что одни минералы после тепловых действий меняют свой цвет, а другие нет, он не только показывал это на опыте, но и пел (при неизменном состоянии вещества) «Каким ты был, таким ты и остался...».

Примерно в 1935 г. Аркадий Константинович женился на Жаворонковой Людмиле Григорьевне, которая пришла работать на его кафедру лаборантом и была моложе его на 13 лет. В 1936 г. у них родилась дочь Маргарита. На следующий год, 15 марта 1937 г., Президиум АН СССР присудил А. К. Подногину ученую степень кандидата геологических наук (без защиты диссертации) за монографию «Микроскопическое исследование породообразующих минералов по методу Е. С. Федорова». В этом же 1937 г. Аркадий Константинович был активным участником Геологического международного конгресса, который проходил в СССР, в том числе и на Урале.

Во время Великой Отечественной войны Аркадий Константинович имел бронь, хотя он состоял в запасе и на фронт все же выехал, но его на полпути вернули обратно в Свердловск. Его жена окончила курсы санитарок и работала в местном госпитале. В 1942 г. Аркадий Константинович прекратил преподавание по специальности кристаллография (он передал эту дисциплину Г. Н. Вертушкову) и сосредоточился исключительно на петрографии. В 1943 г. у него родился первый сын – Валерий, а в 1947 г. второй – Аркадий. Во время войны

Аркадий Константинович постоянно проводил полевые исследования, помогая наращивать рудную базу Уральского региона (фото 6). В частности, вместе с Г. Н. Вертушковым они в 1943–1944 гг. исследовали петрографию и минералогию Вишневогорских месторождений ниобия. Кроме того, Аркадий Константинович совершил немало незаметных подвигов, используя свои знания петрографа: раскрыл преступление об ограблении эшелона с гуманитарной помощью, исследовал причины неполадок в работе приборов на важных месторождениях, исследовал сталь легендарного танка Т-34. Изучением состава стали и консультациями по улучшению и упрочению брони танка он занимался по просьбе руководства Уралмашзавода. Именно Аркадий Константинович дал заключение о том, какие составляющие стали нужно убрать, а какие добавить, чтобы сталь стала непробиваемой.

В годы войны семья А. К. Подногина старалась поддерживать устоявшиеся семейные традиции, например, за стол садиться всей семьей. Вечером перед печкой-«буржуйкой» каждый держал отчет о прошедшем дне. В выходные дни – музыкальные минутки: Аркадий Константинович играл на балалайке и пианино, и все пели частушки, популярные песни. Были и литературные часы: Людмила Григорьевна читала детям рассказы русских и зарубежных классиков.

22 сентября 1948 г. А. К. Подногину присвоено персональное звание – Горный директор I ранга (фото 7), а 16 октября 1951 г. Указом Президиума Верховного Совета СССР Аркадия Константиновича наградили Орденом В. И. Ленина за выслугу лет и безупречную работу. Примерно в это же время ему вручили орден «Знак Почета».

С 1 сентября 1957 г. в связи с переходом Д. С. Штейнберга на работу в Академию наук А. К. Подногина назначили ВРИО заведующего кафедрой петрографии, а 7 февраля 1958 г. Аркадий Константинович официально был избран ученым советом СГИ на пост зав. кафедрой. В начале 1958 г. он работал по совместительству в Уральском научно-исследовательском институте черных металлов. К концу жизни А. К. Подногин практически полностью забросил кристаллографию и сосредоточился на минералогии и петрографии технического камня, в частности и металлургических шлаков. При этом основным занятием для него было преподавание петрографии (фото 8).

В конце 1960 г. Аркадий Константинович перенес инсульт, восстанавливался три месяца и вышел на работу в январе 1961 г. Он нашел в себе силы продолжать читать лекции. К сожалению, 3 мая 1961 г. Аркадий Константино-

СКАЗЫ ПОДГОНИНА

Из воспоминаний дочери Маргариты:

Вспоминаю «лежанку» нашу – самый теплый угол в квартире по адресу ул. Мамина-Сибиряка, д. 183. Там-то и вели мы беседы.

– Пап, ну расскажи сказку…

– Да я, доченька, сказок-то не знаю…

– Ну про то, как ты молодой был…

И начинались «папины сказы».

СКАЗ № 1

– А в реальном училище в г. Мензелинске увлекался я очень поэзией М. Ю. Лермонтова и втихомолку писал стихи. Как-то раз учитель словесности задал нам написать сочинение «Мой любимый поэт» и позволил это сделать без указания фамилии. Лучшее сочинение было прочитано перед всем классом, оно написано было в стихотворной форме, представлено как поэма о поэте, названо «На смерть поэта» и посвящено М. Ю. Лермонтову. Учитель не назвал автора сочинения, хотя и знал, наверное. Ученикам настолько сочинение понравилось, что они непременно захотели узнать, кто его написал. Все кричали: «Кто это написал? «Чье это? Чье это?». А я кричал громче всех: «Чье это? Чье это?». Хотя сочинение это написал я. Не захотел выдавать свою тайну, что грешил стишками, стеснительный был очень.

СКАЗ № 2

– Люблю я лошадок очень. А одна, доченька, такая старая кляча спасла меня. Я уже в институте учился, производственную практику проходил. Делал обход горных выработок – это такие сооружения в земле, благодаря которым можно наблюдать, как залегают породы, есть ли в них рудоносные жилы. Вот подошел я к шурфу – это такая глубокая узкая вертикальная яма в породе. А вот чтобы она, эта яма, не засыпалась (порода-то бывает разная: и камень, и глина, и песок), ее обшивают досками. А чтобы попасть на дно этого шурфа, ставят у входа лебедку (барабан с накрученной веревкой). Один конец веревки привязан к бадье, куда садится человек, чтобы опуститься вниз, а другой к рычагу, который вращает человек, а иногда используют и лошадок для вращения барабана. Лошадке подают команду «Ходи!» Она идет, веревка раскручивается, бадья с человеком опускается до дна забоя. Вижу, стоит лошадка, а рабочего нет. Думаю: «Что я его ждать буду, лошадь умная, сработает и без него». Сел в бадью и скомандовал: «Ходи!», и бадья поехала вниз. Фонарь приготовил, полевую сумку стал открывать, ба…. – остановка, и не просто остановка, уперлась бадья во что-то и клониться стала набок, вот-вот вытряхнет меня. А до забоя лететь да лететь, и вверх по веревке не выберешься. И тут я заорал во всю мочь: «Ходи обратно!» Жду. Смотрю, выправляться стала бадья, и вот уже поползла вверх. А случилось, в общем-то, обычное дело: обшивочная доска оторвалась и встала посреди шурфа. В нее-то и уперлась бадья со мной. Могла бы плохо кончиться эта история, если бы лошадка мне не помогла.

Фото 7. Преподаватели геологоразведочного факультета. 1946 г. Из архива В. В. Григорьева. Персоналии: 1-й ряд (слева направо) – П. И. Кутюхин, К. К. Матвеев, В. Н. Головцын, А. Е. Малахов, М. О. Клер, О. Ф. Нейман; 2-й ряд (слева направо) – А. И. Александров, В. И. Матвеев, Е. И. Тараканова, Е. М. Клер, Д. С. Штейнберг, А. К. Подногин, трое неизвестных, Н. А. Иванов

СКАЗ № 3

– Везло мне всегда, дочка, на хороших людей. Учительствовал я после реального училища в школе, физику, математику и химию вел. Потом директором школы назначили. Уроки я не бросил, а в свободное время рисовал много и играть на фортепиано сам научился. Вот как-то нагрянула к нам в школу комиссия во главе с министром образования Н. К. Крупской. Посмотрели, как я уроки веду, пообсуждали и ждать велели, а чего, я и не догадывался. А через некоторое время на мое имя пришло направление на учебу в вуз. Вот так я попал в Свердловск.

Трудное время тогда было, но интересное. Молодыми мы были, все нипочем. Одни брюки (дырявые сверху и целые снизу) для свиданий на троих, вместо стипендии – мешок крупы или овса. В. Маяковский приезжал к нам, стихи свои орал, нам очень нравилось, да и мы старались от времени не отстать, тоже при случае стихи выдумывали. Два Аркаши у нас на курсе было: я – Аркаша беленький и Переляев Аркаша – черненький, и оба стишки складывали, соревновались между собой.

А какие у нас преподаватели были – гиганты! Я у Алексея Васильевича Шубникова на кафедре любимцем считался. Интересно и ответственно было работать с ним, многому он научил меня, что впоследствии очень пригодилось. А студенты-то всякие бывают, иной норовит и «подкусить» преподавателя, особенно молодого. Вот приходят ко мне как-то раз студенты, протягивают кристалл, красивый такой, прозрачный, и спрашивают: «Аркадий Константинович, не можем определить, что за минерал. Может, вы нам подскажете?» Смотрю, не природный образец-то, и говорю им: «Так это же кристалл сахара!». «Да, – говорят, – мы его специально вырастили, чтобы вас проверить». Проверили.

И вот к нам на кафедру пришла твоя мама, совсем молоденькая, хоть и вдова. Ох, и хороша! И к работе прилежна. Научил я ее из картона разные формы кристаллов делать. Полюбил я ее, все ей романс пел «Скажите, девушки, подружке вашей». А Зинуленька (старшая приемная дочь) звала меня не иначе как «папа Лекарство». Потом и ты появилась, решил я назвать тебя Маргаритой. Есть такой минерал «маргарит» – жемчужная слюдка. Меня давай отговаривать, что это Маргарита, да еще и Аркадьевна! Вон в арии Елецкого из оперы «Пиковая дама» П. И. Чайковского нет ни единого звука «эр», только «эль». А я бегом в ЗАГС и записал тебя, как хотел.

А в войну у нас Валера родился. Я только вернулся с полевых работ, матери и приспичило ночью. Бегаю я по квартире, башмак ищу, куда он запропастился! Мать стонет: «Давай скорее, что ищешь-то?». «Да башмак», – отвечаю. «Да он же у тебя в руке!»

И действительно, любил людей мой папочка, и мне это передал. Смолоду, бывало, на мои восторженные высказывания о ком-либо, качая головой и улыбаясь, говорил: «Ой, Ритка, все у тебя хорошие! Впрочем… как и у меня». За эту любовь и понимание людей (редко ставил он неудовлетворительные оценки студентам) назвали его соратники «либералом», часто ставили в вину, что «не растет научно». А он улыбался и говорил: «Я очень горжусь, что мои многие ученики стали знаменитыми учеными и практиками, в этом и моя заслуга».

Фото 8. Аркадий Константинович Подногин (в центре) преподает петрографию. 1950-е гг. Из [2]

вич умер. Удивительно, но и родное село А. К. Подногина вскоре после его смерти прекратило свое существование. В 1967 г. при пуске Нижнекамской ГЭС и образовании одноименного крупного водохранилища, село Голюшурма ушло под воду. Похоронен Аркадий Константинович на Ивановском кладбище г. Екатеринбурга, его могилу до сих пор посещают те, кому он дорог.

Аркадий Константинович прожил хорошую и насыщенную жизнь, он был женат на любимой женщине, воспитал 4 детей (кроме трех родных детей была еще приемная дочь – Зинаида, см. фото 9). Стоял у истоков создания нового Свердловского горного института в момент развала гигантского Уральского университета, сделал карьеру от лаборанта до заведующего кафедрой. Вместе со своим великим учителем А. В. Шубниковым создал в институте дисциплину кристаллография и сохранил ее после отъезда последнего. Аркадий Константинович написал первые уральские учебники для определения минералов по методу Е. С. Федорова и за свою долгую преподавательскую деятельность подготовил тысячи дипломированных геологов, кристаллографов и минералогов. Он был ведущим специалистом по минералогии и петрографии техногенного камня Уральского региона, за что его даже называли «уральским Белянкиным» (акаде-

СКАЗ № 4

– Папа, а почему тебя не взяли на фронт?

– А у меня, доченька, бронь была. Это такое распоряжение правительства, согласно которому трудиться надо здесь, в тылу. Меня с полпути на фронт прямо с эшелона сняли и вернули снова в Свердловск. Думает наша партия и о будущем России. Война закончится, кто будет искать полезные ископаемые, чтоб поднимать разрушенное? Вот я и оставлен, чтоб готовить молодых геологов, грамотных специалистов. Интересная наука – геология, и профессия у меня интересная. Благодаря своей работе я и Шерлоком Холмсом был, и преступником, и учителем, и ученым.

– Расскажи.

– Урал – опорная часть державы нашей. Сюда секретные заводы и службы во время войны эвакуированы были. Здесь и новые секретные объекты строили, в том числе и полигоны разные. Вот один раз и пригласили меня на такой объект, что-то там с приборами непорядок пошел, консультация специалистов понадобилась. А полигон-то в тайге находился, вдруг геологи рудную жилу какую обнаружат. Указали мне на карте место, куда должен прибыть, на станцию назначения обещали машину подать. Вот приехал я, машины нет. Ну, думаю, сам дойду – не впервой! Иду, пою потихонечку, места красивые, птицы чирикают. Вдруг слышу окрик: «Стой!». Выходит солдат вооруженный и спрашивает: «Кто такой?». «Подногин я, доцент», – отвечаю. «Ах, так ты доцент! Иди и без разговоров!» Привел меня к начальству и докладывает: «Задержан опасный преступник по кличке "доцент"!».

Разобрались, конечно. Помог я им. А мне за это сапоги подарили, да банку тушенки. Обрадовался я очень сапогам-то, до сих пор ношу, вот эти самые.

– Папа, а Шерлоком Холмсом?

СКАЗ № 5

– Трудно все жили в войну. Кожурки от картошки ели, лепешки из отрубей на «глицеринчике». Хорошо, мама из госпиталя мне табачку иногда приносила. Угостят ее раненые, она сделает вид, что курит, а сама цыгарочку мне несет. Закуришь – вроде и есть меньше хочется, и мозги лучше работают. Голод – страшно это. Голодали в тылу, но работали славно! Вот нам, уральцам, чтобы мы еще лучше работали, посылали иногда продукты из других областей страны. Вот пришел как-то поезд, стали разгружать вагон с продуктами, глядь, а продуктов-то в нем нет, забит вагон пустой породой (камнями) из отвалов месторождений. Опять к нам – в институт. Посмотрел я образцы тех пород, вспомнил с какого они месторождения, да и спрашиваю: «На такой-то станции стояли вагоны?». «Да, говорят, и долго». «Вот там и ищите похитителей». И нашли, а мне «спасибо» сказали.

Фото 9. Аркадий Константинович с семьей (нижний ряд, слева направо: жена – Людмила Григорьевна, сыновья Валерий и Аркадий, дочь Маргарита; стоят: приемная дочь Зинаида с мужем). 1952 г. Из архива Л. М. Евдокимовой

СКАЗ № 6

– В войну у нас Уральский танковый корпус был сформирован из молодых ребят, в основном добровольцев. Сделают танк на Уралмашзаводе и отсюда прямым ходом – на фронт. Да вот незадача: первые-то наши танки не выдерживали пуль немецкого оружия, броня на них пробиваемая была. А я тогда много разных работ по изучению пород и шлаков проводил. У меня даже прозвище было, «Уральским Белянкиным» меня называли. Вот ко мне и обратились, чтоб я посоветовал, как сделать, чтобы «броня крепка и танки наши быстры» стали. Изучил я танковую сталь и заключение дал – какой химический элемент добавить в сталь, а какой исключить. Получилось! Очень горжусь я, что тоже внес свою лепту в эту нашу Победу!

– Пап, а знаешь, что про тебя в институте анекдоты ходят? Хочешь, расскажу?

Вот принимаешь ты экзамен у производственников с курсов повышения квалификации, выбираешь самый простой образец, спрашиваешь: «Что это? Название, пожалуйста, породы». Сидящий перед тобой «амбал» рявкает: «Шкварец!» «Правильно, кварц! А это? Ну, ну… Ди…Ди…Ди…» – подсказываешь. Амбал: «Диабаз!» «Правильно, – ты кричишь, – диорит!»

А еще, говорят, что благодаря тебе излюбленным жаргоном студентов стало употребление терминов из кристаллографии: «Как дам сейчас по базопинакоиду!», «Ты что сегодня такой моноэдрический?» или «Ты что такой полиморфный?»

Или разговор двух студентов:

– Ты видел у Аркадия Константиновича галстук? По-моему, он изнашивается гораздо быстрее, чем одежда и обувь.

– Это понятно. Сколько раз он вытаскивал из него по шелковой нити!

Чтобы объяснить студентам, где проходит основная ось кристалла или окуляра микроскопа, Аркадий Константинович вытаскивал нитку из галстука и наглядно это показывал.

мик Д. С. Белянкин (1876–1953) – основоположник технической петрографии).

В честь Аркадия Константиновича в 1993 г. известный ученый-минералог Б. В. Чесноков назвал новый минерал – подногинит [6, 7]. Интересно, что доклад о находке нового минерала был сделан еще в 1991 г. на заседании Ильменского отделения ВМО [8], а вот печатная версия задержалась на целых два года. Борис Валентинович образцы с подногинитом, отобранные в 1982 г., обнаружил в горелом отвале шахты № 44 (северный террикон) в г. Копейске. В технической литературе подногинит, или ромбический γ-$Ca_2[SiO_4]$, известен как кальциооливин (он часто встречается в составе цементного клинкера и в некоторых шлаках) [6].

Подногинит образует мелкозернистые светлые зеленовато-серые или розоватые агрегаты на внутренней поверхности ангидритовой корки «орехов», возникших при обжиге кусков окаменелого дерева. Сопутствующие минералы: сребродольскит, флюорэллестадит, кутюхинит, а также землистые продукты, возникшие при гидратации и карбонатизации первичных извести и периклаза. Все эти образцы являются кусками корки крепкого «ореха», извлеченного из довольно горячей (около 50 °С) стенки вертикального обрыва в красном горельнике. Этот обрыв возник при обвале привершинной части террикона вследствие подработки основания террикона экскаваторами. Данный «орех» интересен и тем, что в нем установлены четыре новых минерала: сребродольскит, флюорэллестадит, подногинит и кутюхинит.

Зернистые агрегаты подногинита легко рассыпаются на удлиненные зерна размером до 0,5 мм. По-видимому, эта механическая непрочность агрегатов связана с объемными эффектами, сопровождающими превращение высокотемпературной фазы $Ca_2[SiO_4]$ в γ-$Ca_2[SiO_4]$. Подобные эффекты приводят к известному рассыпанию при охлаждении известковистых шлаков и клинкеров.

Цвет зерен подногинита бледный зеленовато-серый до бледно-розового, блеск стеклянный и шелковистый из-за обилия микротрещин. Черта – белая, твердость около 5,5, очень хрупкий. Спайность (или отдельность) в двух направлениях. Плотность измеренная 2,77 г/см^3. Пониженное значение плотности (вычисленная плотность 2,99 г/см^3), очевидно, связано с обильной микротрещиноватостью зерен. В иммерсии под микроскопом бесцветный, двупреломление низкое. Двуосный, отрицательный; Ng = 1,644, Nm = 1,640, Np = 1,632, Ng–Np = 0,012.

Химический состав подногинита, полученный микрозондовым анализом, следующий (среднее из 5 анализов, мас. %): SiO_2 – 34,51; TiO_2 – 0,20; Al_2O_3 – 0,03; FeO – 0,06; MnO – 0,05; MgO – 0,03; CaO – 65,87; Na_2O – 0,16; сумма – 100,91. Данные анализа пересчитываются на эмпирическую формулу – $Ca_{2.04}[(Si_{0.99}Ti_{0.01})_{1.00}O_{4.00}]$ или идеализированную формулу – $Ca_2[SiO_4]$. Дифрактограмма подногинита аналогична порошкограмме синтетического соединения γ-$Ca_2[SiO_4]$. Минерал ромбический; a = 5,078(1); b = 11,205(4); c = 6,733(7) Å; V = 383,10 Å^3.

Подногинит является веществом антропогенного (техногенного) происхождения (горящий угольный отвал). Нынешние правила Международной минералогической ассоциации (ММА) не допускают, чтобы такие вещества были утверждены в качестве действительных минеральных видов, поэтому, по словам В. И. Кудряшовой [9]: «6 минералов не рассматривались КНМ ВМО и ММА: овчинниковит, игниколорит, торбаковаит, *подногинит*, кутюхинит и перковаит».

Примерно через 11 лет после открытия подногинита его природный аналог был обнаружен в 2004 г. и утвержден ММА в 2007 г. под названием кальциооливин [10, 11].

Кальциооливин был назван по своему химическому составу. Он был обнаружен в метакарбонатных ксенолитах среди плиоценовых кислых игнимбритов Верхнечегемской кальдеры на горе Лакарги (Кабардино-Балкария, Россия). Минерал был впервые обнаружен в достаточных количествах, чтобы провести весь комплекс методов исследования. Он образует зернистые агрегаты и окрашен в светло-розоватый цвет за счет мелких включений берналита. Двуосный, отрицательный; Ng = 1,657, Nm = 1,653, Np = 1,642, Ng–Np = 0,015. Плотность измеренная 2,91 г/см^3, вычисленная 2,98 г/см^3. Твердость 4,5. Химический состав кальциооливина следующий, мас. %: P_2O_5 – 0,12; SiO_2 – 34,72; Al_2O_3 – 0,11; MgO – 0,10; CaO – 64,29; Na_2O – 0,38; сумма – 99,72. Он вполне удовлетворяет идеализированной формуле $Ca_2[SiO_4]$, является ромбическим с пространственной формой *Pbnm*, параметры элементарной ячейки: a = 5,074; b = 11,211; c = 6,753 Å, V = 384,17 Å^3. Интересно, что в изученной породе присутствует и моноклинный диморф кальциооливина – ларнит, но они друг с другом не контактируют. Сам кальциооливин встречается исключительно со спурритом и замещается низкотемпературным вторичным минералом – гиллебрандитом [10, 11].

Как видно из приведенного описания, кальциооливин является полной копией подногинита. Это вызывает некоторое недоумение, почему русскоязычные и работающие в России авторы находки кальциооливина не оставили ему прежнее название – подногинит. Ведь минерал уже описывался Б. В. Чесноковым (1928–2005), и у них была уникальная возможность почтить Бориса Валентиновича – известного советского и российского минералога, тем более что многие из этих авторов были с ним знакомы.

Фото 10. Бежевый кальциооливин в метакарбонатной матрице. Верхнечегемская кальдера, гора Лакарги, Россия. С сайта mindat.org

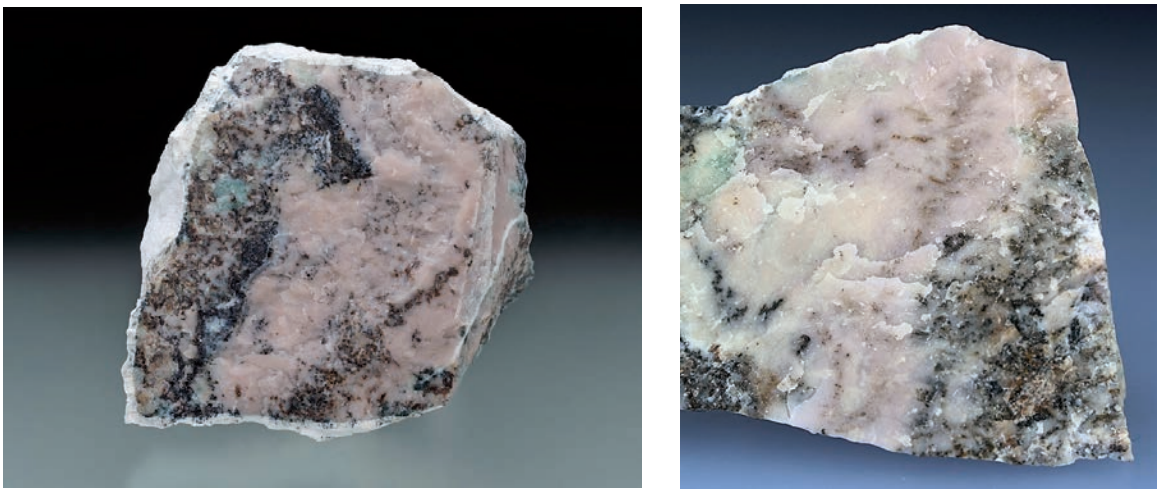


Фото 11. Скопления розоватого кальциооливина в породе. Эйфель, Германия. С сайта e-rock.com

Фото 12. Белый кальциооливин в метакарбонатной матрице. Эйфель, Германия. С сайта mineralienatlas.de

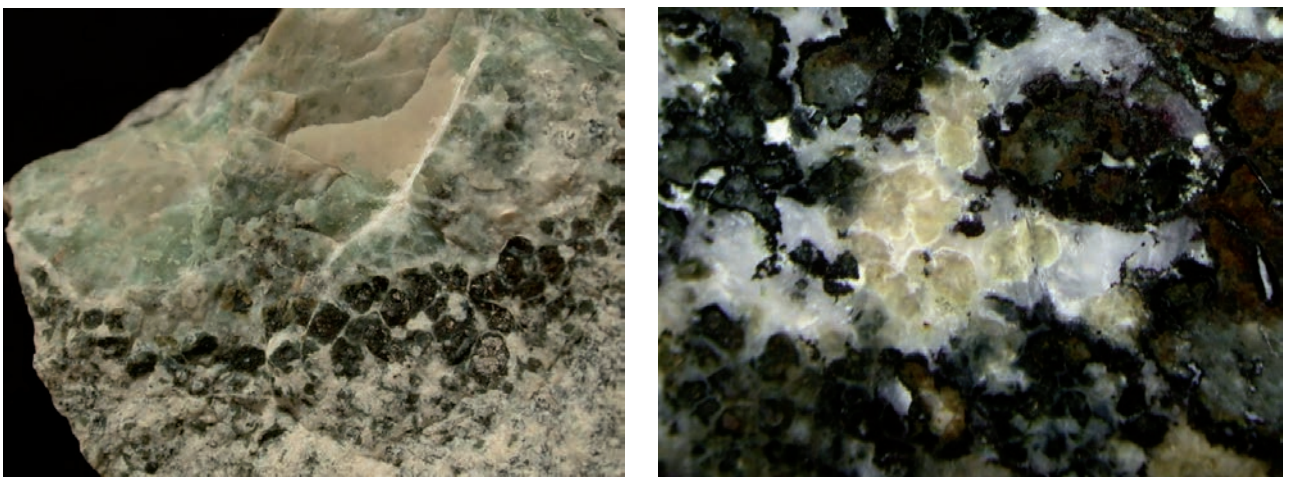


Фото 13. Бежевый кальциооливин в метакарбонатной матрице с черными кристаллами джасмундита. Эйфель, Германия. С сайта mindat.org

К сожалению, из-за неочевидной и немного странной позиции ММА, которая могла поправить первооткрывателей кальциооливина и предложить оставить первичное название, подногинит постепенно стирается из мировой минералогии.

В целом кальциооливин является редким природным минералом, который пока обнаружен в скарнах России (фото 10), Германии (фото 11–14) и США. Он ценится у коллекционеров в первую очередь как редкий минерал.

а *б*

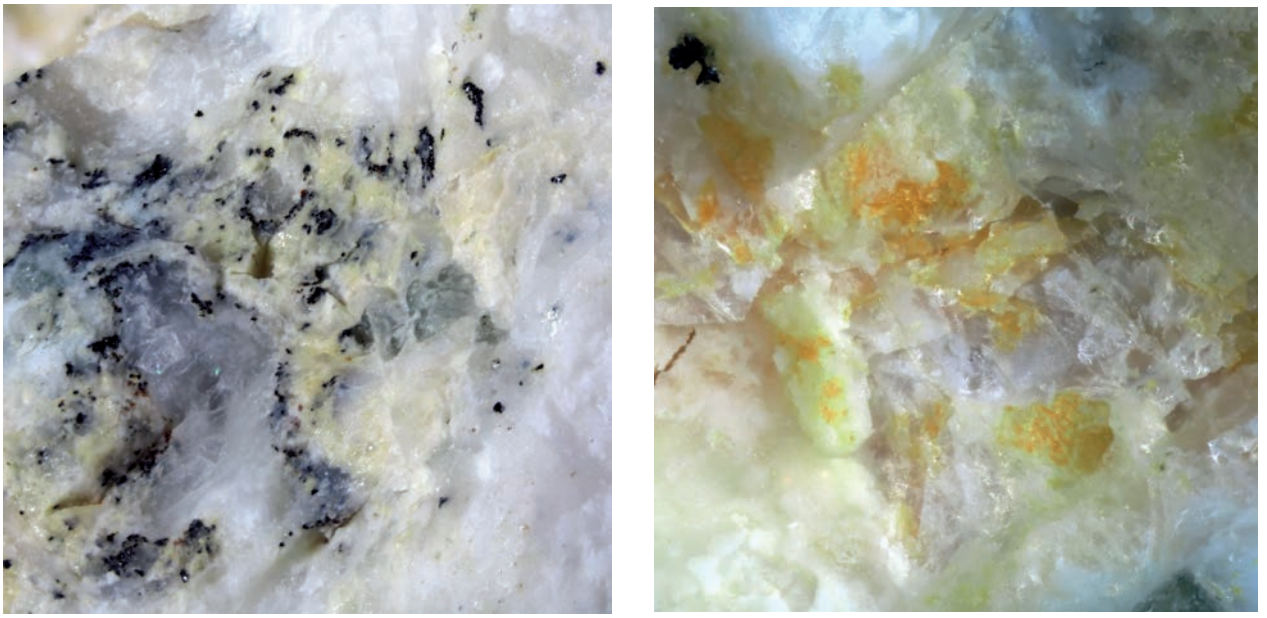


Фото 14. Кристаллы и скопления желтоватого кальциооливина в породе. Эйфель, Германия:
а – внешний вид образца;
б – сильно увеличенный фрагмент. С сайта e-rock.com

ЛИТЕРАТУРА

1. Архипова Н. П., Филатов В. В. Исследователи природы Урала. XX век. Екатеринбург: Изд-во Екатеринбург, 2001. 272 с.
2. Емлин Э. Ф. Очерки истории кафедры минералогии Уральского горного института. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2008. 257 с.
3. Емлин Э. Ф. Материалы к биографии Григория Николаевича Вертушкова – основателя Уральской школы прикладной минералогии // Уральский геологический журнал. 2008. № 6 (66). С. 12–48.
4. Филатов В. В. «Отечества пользы для…» (75 лет Уральскому горному институту). Екатеринбург: УГИ, 1992. 408 с.
5. Войтеховский Ю. Л. Несколько фото из архива профессора Д. П. Григорьева // Двадцать третьи Всероссийские научные чтения памяти ильменского минералога В. О. Полякова. Миасс: ИМин ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН, 2022. С. 130–140.
6. Чесноков Б. В., Баженова Л. Ф., Бушмакин А. Ф., Вилисов В. А., Крецер Ю. Л., Нишанбаев Т. П. Новые минералы из горелых отвалов Челябинского угольного бассейна (сообщение четвертое) // Уральский минералогический сборник. 1993. № 1. С. 3–25.
7. Чесноков Б. В., Щербакова Е. П., Нишанбаев Т. П. Минералы горелых отвалов Челябинского угольного бассейна. Миасс: ИМин УрО РАН, 2008. 139 с.
8. Ершов В. В. Доклады, прочитанные на заседаниях Ильменского отделения ВМО в 1991 и 1992 годах // Уральский минералогический сборник. 1993. № 2. С. 209–210.
9. Кудряшова В. И. Новые минералы. XLIX // Записки ВМО. 1995. № 6. С. 108–120.
10. Задов А. Е., Газеев В. М., Перцев Н. Н., Гурбанов А. Г., Гобечия Е. Р., Ямнова Н. А., Чуканов Н. В. Кальциооливин γ-Ca_2SiO_4: старый и новый минеральный вид // Записки РМО. 2008. Ч. 137. Вып. 6. С. 46–57.
11. Zadov A. E., Gazeev V. M., Pertzev N. N., Gurbanov A. G., Yamnova N. A., Gobechiya E. R., Chukanov N. V. Discovery and investigation of a natural analog of calcio-olivine (γ-Ca_2SiO_4) // Doklady Earth Sciences. 2008. Vol. 423A. Issue 9. P. 1431–1434.

Статья поступила в редакцию 05 февраля 2024 года

http://doi.org/10.21440/2307-2091-2024-1-193-211

Путь длиною в век: от лаборатории магнитометрии до кафедры геофизики Уральского государственного горного университета

A century-long journey: from the magnetometry laboratory to the department geophysics of the Ural State Mining University

Жанна Николаевна АЛЕКСАНДРОВА*
Юрий Владимирович БЕЛЫШЕВ**
Ксения Васильевна ВАНДЫШЕВА***
Татьяна Анатольевна ГЛУШКОВА****
Николай Сергеевич ЗЕМЦОВ*****
Ирина Евгеньевна ШИНКАРЮК******

Уральский государственный горный университет,
Екатеринбург, Россия

*chembrovich@inbox.ru
**k032943@yandex.ru
***vandysheva_ksenya@mail.ru
****nedra@uralnedra.ru
*****nikolaj.zemtsov@yandex.ru
******shinkaryuk64@inbox.ru

Zhanna Nikolaevna ALEKSANDROVA*
Yuriy Vladimirovich BELYSHEV**
Kseniya Vasil'evna VANDYSHEVA***
Tat'yana Anatol'evna GLUSHKOVA****
Nikolay Sergeevich ZEMTSOV*****
Irina Evgen'evna SHINKARYUK******

Ural State Mining University,
Ekaterinburg, Russia

*chembrovich@inbox.ru
**k032943@yandex.ru
***vandysheva_ksenya@mail.ru
****nedra@uralnedra.ru
*****nikolaj.zemtsov@yandex.ru
******shinkaryuk64@inbox.ru

Аннотация

Началом образования Уральской геофизической школы можно считать созданную в 1924 г. при кафедре магнитометрии лабораторию магнитометрии, к которой затем добавились лаборатории ферромагнетизма, микромагнетизма, электрометрии, гравиметрии и сейсмометрии. На основе этих геофизических лабораторий и начали вести подготовку инженеров-геофизиков. В настоящее время кафедра геофизики является одной из самых крупных среди выпускающих кафедр Уральского государственного горного университета. Кафедра обладает высококвалифицированным преподавательским составом. В распоряжении кафедры геофизики 11 оснащенных лабораторий и база полевой учебной геофизической практики в поселке Верхняя Сысерть Свердловской области. Имеются все условия для научной и производственной деятельности как сотрудников кафедры, так и обучающихся в университете студентов. Все это позволяет стабильно обеспечивать высокий уровень подготовки специалистов-геофизиков.

Ключевые слова: геофизика, кафедра, лаборатория, Горный университет, Урал.

Abstract

The creation, formation and development of mining and mining science in Russia is largely due to the activities of many foreign specialists, in particular, the native of Austria I. F. Herman (1755–1815), who came to Russia in 1782. Scientific and practical activities of Herman was multifaceted: according to his project, the country's first steel factory was built in the Urals; to study geology and mining, he made five trips to the Urals and Siberia; in 1802–1812 he was the head of the mining administration of the Urals; in 1803 he created the first printing house in the Urals in Yekaterinburg; he was a member of the Berg College, holding the rank of Oberberg-Hauptmann class IV; in 1790 he was elected ordinary academician of the St. Petersburg Academy of Sciences; he published about 60 works on various issues of mining, geology, mineralogy and statistics; his name was widely known in various European academies and scientific societies.

Keywords: Austria, Benedict Franz Johann von Hermann, Russia, Ural, Siberia, academician Ivan Filippovich Herman.

Планомерное, систематическое изучение недр Уральского региона началось после Великой Октябрьской социалистической революции. 1 июня 1920 г. утверждается Уралгорком (Уральский горный комитет) – первенец централизованной геологической службы Урала. В 1929 г. Уралгорком был преобразован в Уралгеолком, а затем в Уральское территориальное геологическое управление. Долгие годы в этой единой системе были сосредоточены все геологоразведочные работы на огромной территории – от Полярного Урала до Северного и Западного Казахстана. Эти усилия привели к открытию многих крупных месторождений полезных ископаемых и способствовали экономическому развитию регионов. 1920 г. стал важной вехой в истории уральской геофизики. В Уральском горном институте начала формироваться научно-педагогическая школа по геофизике.

Фото 1. Петр Константинович Соболевский

Кафедра геофизики была создана 26 ноября 1929 г. Возглавил ее профессор Петр Константинович Соболевский (фото 1). Именно в 1929 г. кафедра геофизики получила первые собственные кадры. Это были выпускники кафедры маркшейдерии Иван Иванович Дерябин и Мануил Федорович Богатырев (фото 2), закончившие в 1929 г. теоретическое обучение. В свидетельствах, полученных ими в начале следующего года, было написано, что они удостоены звания горного инженера по горно-геометрической и геофизической специальности. В 1930 г. кафедра геофизики чествовала еще двух инженеров-геофизиков: Петра Александровича Королькова (1900–1975) и Дмитрия Степановича Микова (1903–1985).

Та огромная работа, которую удалось проделать на Урале, «сделалась возможной только благодаря необычайно тесной и глубокой связи школы и производства, школы и промышленной жизни, благодаря весьма дружной семье преподавательского персонала школы, аспирантов, выдвиженцев и вообще всех студентов...»

Фото 2. Первые ученики П. К. Соболевского.
Слева направо: 1-й ряд (сидят): И. И. Дерябин, М. Ф. Богатырев,
П. К. Соболевский, Д. Н. Оглоблин, В. М. Логиновский, П. А. Корольков;
2-й ряд: С. А. Харитонов, П. А. Рыжов, Е. И. Ворожцова, Д. С. Миков, Г. И. Вилесов, Б. А. Калганов [1]

Фото 3. Студенты V курса геофизической специальности Уральского горного института.
1935 г. Из архива кафедры

Фото 4. Кафедра геофизических методов. 1948 г.
Слева направо: 1-й ряд: А. Я. Ярош, Н. А. Иванов, В. Н. Головцын, Г. П. Саковцев, Е. К. Микшевич, Б. И. Страхов;
2-й ряд: Н. С. Шмелев, Л. И. Ансимова, К. Н. Ансимов, М. А. Иванова, Г. И. Гринкевич, Л. И. Пискунов,
Н. Ф. Полякова, А. Б. Поляков [1]

Фото 5. Кафедра рудной геофизики. 1967 г.
Слева направо: 1-й ряд: А. С. Истомина, Л. Г. Саковцева, . П. Алексеева, Г. П. Саковцев, Л. В. Красильникова, А И. Соколова;
2-й ряд: В. Н. Микшевич, Г. С. Возженников, Н. И. Выгузов, Г. Г. Аржаников, М. И. Выгузова, А. А. Редозубов, В. М. Сапожников,
С. А. Игумнов, И. Г. Сковородников, Э. А. Трубов;
3-й ряд: Ю. Б. Давыдов, Р. С. Хаверс, Н. Д. Теплых, И. И. Бреднев[1]

«Наши уральские геофизические разведочно-исследовательские работы существенно отличаются от таковых Москвы и Ленинграда – именно наш Уральский ВТУЗ, наша геофизическая лаборатория Уральского горного института проводила и проводит иной подход к делу геофизических разведок... Наша точка зрения заключается в том, что геофизик-разведчик – это не только физик-геофизик. Чтобы характеризовать нашу точку зрения, недостаточно сказать и что это геофизик-геолог – это сочетание необходимо, но, по-нашему, должно быть дополнено сочетанием с разрабатываемой в нашем институте геометрией недр...

Фото 6. А. К. Козырин с коллегами по кафедре.
Слева направо: 1-й ряд: М. И. Выгузова, А. К. Козырин, З. П. Алексеева, Г. Г. Аржанников, Н. И. Выгузов;
2-й ряд: В. Горев, В. М. Сапожников, С. С. Сысков, Н. Д. Теплых, И. Г. Сковородников

Фото 7. Кафедра геофизики. 2006 г.
Слева направо: 1-й ряд: В. М. Сапожников, А. А. Куницын, С. А. Игумнов, Г. С. Возженников, В. И. Фоминых;
2-й ряд: В. Е. Петряев, И. Д. Сарвартинов, С. И. Шаров, Н. С. Земцов, Л. А. Болотнова,
В. Б. Виноградов, Н. В. Блинкова, А. А. Редозубов, Г. А. Косарева, А. В. Кузин, И. Г. Сковородников, А. Г. Талалай,
Ж. Н. Александрова

По существу своих работ разведчик должен рассматривать недра как следствие физико-химических процессов жизни Земли в минувшие геологические эпохи. И для понимания общей картины недр разведчик пользуется всеми доступными ему средствами – геофизикой, геохимией и геологией, относя результаты наблюдений к определенным координатам пространства и времени, другими словами, подчиняя геометрии недр».

Г. И. Вилесов писал: «Петр Константинович рассматривал геометризацию как научный метод познания различных явлений недр... Многие дела и явления, связанные с горной практикой, он начал рассматривать как материальные тела в состоянии, аналогичном физическому полю. В связи с этим им были разработаны вопросы о геометрической интерпретации некоторых свойств физического поля и дана теория геометрии поля, геометрии потока и предложены приборы для их автоматической регистрации (деформатографы)».

Соболевский был превосходным педагогом-методистом. Свой главный педагогический принцип он формулировал так: «Учить надо рассказом и показом». Поэтому, работая со студентами, он, изложив какой-либо теоретический вопрос, сразу же закреплял его, предлагая студентам выполнить соответствующую практическую

Фото 8. Кафедра – член Ассоциации «АИС», МОО ЕАГО и Ядерно-геофизического общества

работу. Его занятия не имели жесткого деления на лекционные и практические, а манера общения была эмоциональной и даже оригинальной. Петр Константинович мог, читая лекцию, забывшись, неожиданно перейти с русского языка на итальянский, с итальянского на французский. Опомнившись, он начинал говорить по-русски, чтобы через минуту увлечь аудиторию уже рассказом о каком-нибудь казусе из истории геофизики.

Такое поведение профессора забавляло студентов, а то, что они не понимали из услышанного на иностранных языках, постигали самостоятельно по учебникам. Но экзаменатором он был требовательным. «Для студентов он был тем примечателен, – вспоминал Корольков, – что стоило очень большого труда сдать ему зачет, потому что он требовал не столько знания предмета, сколько понимания его, и стремился поднять уровень знаний и интересов студентов также в ... дисциплинах, не имеющих прямого отношения к ... предметам его кафедры».

Второй педагогический принцип Соболевского: «Учи, учись и не отрывайся от производства и живой природы». Для геофизика производство и живая природа – это почти одно и то же. Это геологическая среда с протекающими в ней разнообразными физико-химическими явлениями. Поэтому при обучении очень важно оценить соотношение между физикой и математикой, методы которых описывают эти явления и строение изучаемых геологических объектов. Этим важнейшим методологическим вопросом задавались исследователи и до Соболевского [1–3].

Отметим основные даты в развитии кафедры геофизики. В 1933 г. П. К. Соболевский передал руководство кафедрой своему ученику Петру Александровичу Корольков. С 1934 по 1948 г. кафедру возглавлял Василий Николаевич Головцын (фото 3, 4). Вначале кафедра геофизики разделилась на две: кафедру магниторазведки и гравиразведки (зав. Н. А. Иванов) и кафедру электроразведки и сейсморазведки (зав. Г. П. Саковцев). В 1953 г. была организована кафедра геофизических методов поисков и разведки месторождений редких и радиоактивных металлов (зав. Н. А. Иванов, с 1957 г. – Г. П. Саковцев, фото 5, с 1985 г. – А. А. Редозубов, с 1988 по 1995 г. – Ю. Б. Давыдов). В 1956 г. кафедру электросейсморазведки объединили с кафедрой магниторазведки, образовалась кафедра геофизических методов поисков и разведки месторождений полезных ископаемых (зав. А. Я. Ярош). В 1980 г. кафедра геофизических методов поисков и разведки месторождений редких и радиоактивных металлов разделилась на кафедру рудной и промысловой геофизики (зав. А. А. Редозубов) и кафедру ядерной геофизики (зав. Г. С. Возженников).

В 1995 г. на базе кафедры рудной и промысловой геофизики и кафедры ядерной геофизики созданы кафедра прикладной геофизики (зав. И. Г. Сковородников), фото 6. В апреле 2001 г. состоялась очередная реорганизация, в состав кафедры прикладной геофизики влились сотрудники других кафедр, после которой кафедра получила название кафедры геофизики (зав. А. Г. Талалай, который заведует кафедрой геофизики и по сей день), фото 7.

За время существования кафедры выпущено около 5000 специалистов. Среди них – Герой Социалистического труда, лауреаты Сталинской и других государственных премий, Заслуженный деятель науки и техники, 22 пер-

вооткрывателя месторождений. Сотрудники кафедры защитили свыше 100 докторских и кандидатских диссертаций. Кафедра является членом Евро-Азиатского геофизического общества (МОО ЕАГО), Международной Ассоциации научно-технического и делового сотрудничества по геофизическим исследованиям и работам в скважинах (Ассоциация «АИС») и Ядерно-геофизического общества (фото 8). На кафедре действуют Научно-образовательный центр «Ростехразведка» (рук. В. Б. Писецкий, проф., д-р геол.-минерал. наук) и Научно-аналитический центр «НЕДРА». Совместно с Институтом геофизики УрО РАН кафедра постоянно участвует в организации и проведении Уральской молодежной научной школы по геофизике и ежегодного симпозиума «Геология и геофизика XXI века. Наука. Производство. Образование».

Фото 9. Глеб Павлович Саковцев

Лаборатория электроразведки Саковцева Глеба Павловича

Глеб Павлович Саковцев является основоположником теории скважинной электроразведки. Основные труды посвящены развитию и совершенствованию методов электроразведки при изучении колчеданных месторождений Урала; высказал идею об электролитическом способе определения удельного электрического сопротивлении горных пород; предложил электрохимический способ поисков месторождений; ему принадлежит идея токового варианта вызванной поляризации; высказал предположение о существовании надрудных зон с характерными физическими свойствами пород и предложил использовать это явление для поисков глубокозалегающих месторождений. При активном участии Глеба Павловича открыт целый ряд медноколчеданных месторождений на Урале (Северное, Северно-Комсомольское, Светлореченское и т. д.) [3].

САКОВЦЕВ Глеб Павлович (09.11.1912 – 24.01.1985) в 1938 г. окончил Свердловский горный институт по специальности «Геофизические методы разведки», специалист в области электроразведки, д-р геол.-минерал. наук, профессор (фото 9).

В первые годы преподавание электроразведки и полевые опытные и производственные электроразведочные работы проводились на базе единой лаборатории геофизики, организованной П. К. Соболевским в 1927 г. Отдельная лаборатория электроразведки была создана в середине 1930-х гг., когда заведующим кафедрой геофизических методов стал ученик П. К. Соболевского В. Н. Головцын, известный электроразведчик, прошедший аспирантуру у одного из основоположников советской электроразведочной науки А. А. Петровского. С 1949 г. после ухода В. Н. Головцына руководителем лаборатории стал Г. П. Саковцев. В середине 1970-х гг. руководство лаборатории перешло к А. А. Редозубову (фото 10, 11).

В 1957 г. кафедру возглавил профессор, д-р геол.-минерал. наук Г. П. Саковцев, который оставался ее заведу-

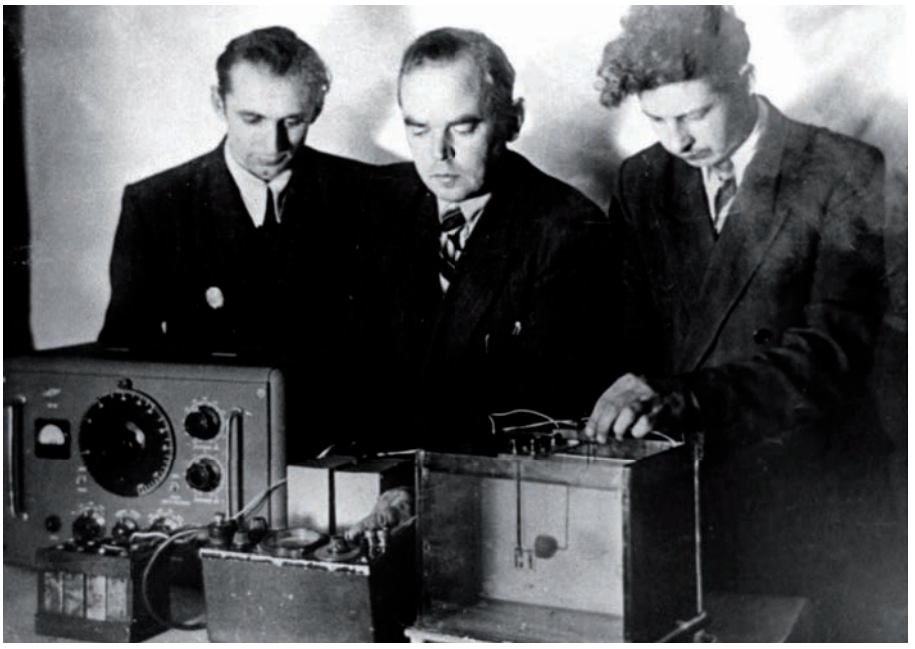


Фото 10. А. А. Редозубов, Г. П. Саковцев и Л. С. Тальвинский в лаборатории электроразведки

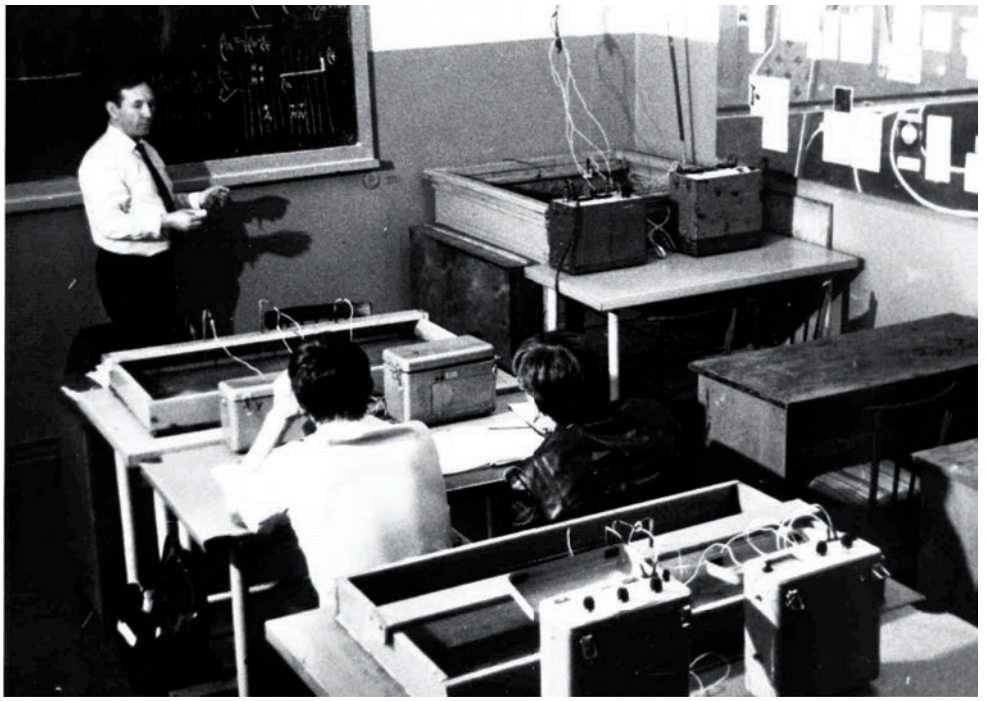


Фото 11. С. С. Сысков ведет занятия в аудитории

Фото 12. Андрей Яковлевич Ярош

ющим на протяжении 27 лет, до 1985 г. При этом свыше 20 лет, с 1960 по 1981 г., он был еще и ректором Свердловского горного института и внес огромный вклад в развитие его материальной базы.

Глеб Павлович добивается открытия при кафедре рудной геофизики проблемной научно-исследовательской лаборатории геофизических методов поисков и разведки глубокозалегающих рудных месторождений Урала с госбюджетным финансированием и становится ее научным руководителем. При лаборатории создается полевая геофизическая экспедиция, оснащенная новыми образцами геофизического оборудования. В 1964 г. по инициативе Г. П. Саковцева на кафедре рудной геофизики начинается подготовка инженеров-геофизиков по новой специализации «Геофизические методы исследования скважин», а в 2000 г. на основе этой специализации открыта соответствующая специальность.

По инициативе Г. П. Саковцева на кафедре рудной геофизики в 1971 г. создается первая в институте вычислительная лаборатория, оснащенная малыми электронно-вычислительными машинами (Проминь, Наири). Благодаря этому на кафедре развиваются новые направления: математическое моделирование геофизических полей и компьютерные технологии обработки геофизических данных.

Несмотря на большую загруженность в должности ректора института, Глеб Павлович никогда не прекращал педагогическую деятельность. Он продолжал читать лекции по спецкурсу «Электроразведка», руководил выполнением курсовых и дипломных работ, работал с аспирантами. Подготовил 10 кандидатов и четырех докторов наук.

Особенно ярко проявились организаторские способности Г. П. Саковцева на посту ректора Свердловского горного института. За 20 лет, в течение которых Глеб Павлович был ректором, построены: база геофизической практики в пос. В. Сысерть с коттеджами для преподавателей, общежитиями для студентов и столовой, пристрой к 3-му учебному зданию, Дом спорта, жилой дом (140 квартир) для преподавателей и сотрудников, 4-е учебное здание, два студенческих общежития.

Глеб Павлович был инициатором создания в городе Совета ректоров вузов Свердловской области и был его председателем до 1981 г. Г. П. Саковцеву присвоено почетное звание «Заслуженный деятель науки и техники РСФСР», он награжден орденами Ленина, Трудового Красного Знамени, «Знак Почета», медалями, знаком «Шахтерская слава». Автор и соавтор более 70 печатных работ, им получены четыре авторских свидетельства на изобретения.

Фото 13. Г. Д. Дементьева и А. Я. Ярош. Обсуждение результатов научных исследований

Фото 14. А. С. Филюшкин проводит занятие по изучению аппарата маятников Штюкрата. 1968 г.

Лаборатория гравимагниторазведки
Яроша Андрея Яковлевича

ЯРОШ Андрей Яковлевич (18.11.1908 – 07.11.1979) в 1936 г. окончил Свердловский горный институт по специальности «Геофизические методы разведки», д-р геол.-минерал. наук (фото 12).

Основные труды посвящены проблеме поисков месторождений угля на восточном склоне Урала; месторождений железа, меди, хромитов; оценке перспектив нефтегазоносности Урало-Поволжья. Дал обоснование возможности применения гравиметрии и разработал методику гравиметрических исследований при поисках месторождений железа и меди. Способствовал открытию Кушмурунского буроугольного месторождения и Северо-Маканского месторождения меди и существенному увеличению разведанных запасов Сибайского медного, Качарского и Соколовско-Сарбайского железорудных месторождений. Изучал глубинное строение Волго-Уральской нефтегазовой провинции и западного склона Урала. Разработал методику комплексного анализа геолого-геофизических данных для изучения рельефа поверхности кристаллического фундамента и более глубоких границ раздела в земной коре и для изучения разрывной тектоники. Составил структурную карту поверхности фундамента. Определил мощности отдельных горизонтов платформенного чехла и мощности основных слоев

Фото 15. Ученики А. Я. Яроша: А. Б. Поляков, Г. Г. Кассин, В. В. Суворов. 1983 г.

Фото 16. Международная геофизическая конференция. Ялта. 1989 г. Слева направо: В. В. Филатов, А. В. Цирульский, С. С. Красовский, В. Шковранек

Фото 17. Г. И. Гринкевич (слева) и Г. Я. Дементьев в лаборатории магниторазведки [3]

земной коры. Составил карту разломно-блоковой тектоники. Установил связи между строением нижних и верхних горизонтов земной коры. Выявил взаимоотношения Русской платформы и Урала. Награжден медалями СССР. Подготовил 13 кандидатов наук, 4 из которых стали докторами наук [3].

В 1924 г. на горном факультете УПИ при кафедре маркшейдерии создается лаборатория магнитометрии. Впоследствии к ней добавились лаборатория ферромагнетизма, микромагнетизма, электрометрии, гравиметрии и сейсмометрии. Это были первые в стране учебные и научно-исследовательские лаборатории прикладной геофизики. Создание лабораторий и приобретение необходимого геофизического оборудования стали базой, на которой начали вести подготовку инженеров-геофизиков.

В Свердловском горном институте проводниками и творцами бескровной гравиметрической революции стали А. Я. Ярош и его коллеги: А. Б. Поляков, К. Н. Ансимов, Е. К. Микшевич, И. Ф. Таврин, Л. Ф. Ауэ, к которым позже присоединились: Г. Г. Кассин, Н. А. Плохих, В. В. Суворов, В. В. Филатов и др. (фото 13–17).

В настоящее время лаборатория гравимагниторазведки оснащена гравиметрами разных моделей, вариометрами, магнитометрами разных моделей, аэромагнитной станцией, осциллографом, генератором сигналов и др.

Сейсморазведочное образование в Горном университете

Впервые самостоятельный курс сейсмической разведки был прочитан студентам геолого-геофизической специальности Свердловского горного института (СГИ) в 1938 г. доцентом Бугайло Владиславом Антоновичем (фото 18). В послевоенные годы к преподаванию сейсмической разведки были причастны ассистент, в последующем профессор Козырин Анатолий Константинович, и ассистент, в последующем старший научный сотрудник Института геофизики УрО РАН Буньков Александр Михайлович.

В начале 1950-х гг. основные курсы лекций по сейсморазведке начал читать прибывший после окончания аспирантуры у профессора В. Н. Дахнова в Московском нефтяном институте (ныне Российский государственный университет нефти и газа) канд. геол.-минерал. наук Борис Васильевич Дорофеев. В 1956 г. на преподавательскую работу приходит Владислав Николаевич Шмаков. Именно Б. В. Дорофеев и В. Н. Шмаков в конце пятидесятых годов начинают активную деятельность по формированию нового направления – рудной сейсморазведки.

Фото 18. Владислав Антонович Бугайло

Фото 19. Кафедра структурной геофизики и геокартирования. 1991 г.
Слева направо: 1-й ряд: А. Б. Поляков, Е. К. Микшевич, М. М. Кассина, Г. И. Гринкевич, Б. В. Дорофеев, В. И. Бондарев;
2-й ряд: С. И. Шаров, В. В. Суворов, В. В. Филатов, Г. Г. Кассин, В. Б. Писецкий, С. М. Крылатков;
3-й ряд: М. И. Полоцкий, Е. Н. Белова, Л. Э. Сапогова, Л. И. Клюка, Л. И. Фролова, В. Б. Виноградов;
4-й ряд: А. В. Лукас, А. В. Диаров, В. И. Самсонов, А. Э. Зудилин, Ю. В. Патрушев[1]

В 1960-е гг. курс сейсмической разведки читают доценты В. Н. Шмаков и В. И. Бондарев. Практические занятия ведет ассистент Ю. М. Гордиенко. В начале 1980-х гг. преподаватели-сейсморазведчики обратили свои научные интересы в область техники и технологии цифровой обработки данных. Работы в этом направлении возглавил доцент В. Б. Писецкий. Чтение лекций по сейсморазведке в эти годы ведут доценты В. Н. Шмаков и В. Б. Писецкий. В проведении практических занятий начал участвовать ассистент С. М. Крылатков. В 1991 г. одну из трех геофизических кафедр – кафедру структурной геофизики – возглавил проф. В. И. Бондарев (фото 19). Благодаря его усилиям была начата углубленная подготовка выпускников в области сейсморазведки. В это время к процессу подготовки специалистов-сейсморазведчиков привлечены высококвалифицированные работники производства – профессор, д-р геол.-минерал. наук С. Н. Кашубин и начальник партии обработки сейсмических материалов В. В. Рябков. Практические и лекционные занятия стала проводить старший преподаватель Н. А. Крылаткова. Достигнутый за последние десятилетия уровень качества подготовки специалистов оценивается производственниками как достаточно высокий. Кафедра геофизики нефти и газа была признана базовой кафедрой по подготовке специалистов-сейсморазведчиков для крупнейших производителей сейсморазведочных услуг в России [4].

Большую помощь в оснащении кафедры сейсморазведочной аппаратурой оказало предприятие ООО «Хантымансийскгеофизика» (генеральный директор И. С. Муртаев).

Фото 20. Геннадий Сергеевич Возженников

Лаборатория радиометрии и ядерной геофизики Возженикова Геннадия Сергеевича

ВОЗЖЕНИКОВ Геннадий Сергеевич (23.01.1931 – 14.07.2012) в 1953 г. окончил Свердловский горный институт по специальности «Геофизические методы поисков и разведки месторождений радиоактивных руд», специалист в области ядерной геофизики, д-р геол.-минерал. наук, профессор (фото 20, 21).

Вся трудовая деятельность Г. С. Возженикова связана со Свердловским горным институтом. Прошел путь от ассистента до профессора кафедры рудной геофизики, заведующего кафедрой ядерной геофизики. Был куратором ядерно-геофизической специализации, ведущим специалистом по дисциплинам ядерно-геофизического профиля. Им создана школа геофизиков ядерного профиля при СГИ, подготовлены 4 доктора и около 20 кандидатов наук, более 1000 инженеров-геофизиков. Им обоснована и доказана высокая эффективность различных методов ядерной геофизики на разных стадиях геологоразведочных работ.

Основные труды посвящены формированию и развитию перспективного научного направления «Ядерно-гео-

Фото 21. Г. С. Возженников с однокурсниками. 1951 г.

физические технологии контроля качества минерального сырья». Решил проблемы дистанционного определения линейных запасов полезных компонентов в рудных подсечениях разведочных скважин на примере медноколчеданных руд (технология измерений в 1962 г. защищена Госкомитетом по делам изобретений и открытий при Совете Министров СССР). Предложил и развил теорию временной селекции в активационном анализе и теорию оптимизации дискретных нейтронно-активационных измерений. Выявил аналитические зависимости, имеющие универсальный характер и применяющиеся, в частности, для расчета временных параметров активационного цикла на золото в условиях Батагайского ядерно-геофизического комплекса. Впервые на Урале выполнил нейтронно-активационные измерения и получил положительные результаты при локализации ореолов щелочного метасоматоза в скважинах (в 1992 г. способ защищен авторским свидетельством), что имеет большое значение для прогнозирования скрытого оруденения. Один из разработчиков системы дистанционного контроля качества энергетических углей, основанной на тензометрическом взвешивании и акустической локации «рельефа» угольной массы, находящейся в движении. Эта система обладает универсальными свойствами и может быть применена для дистанционного контроля качества минерального сырья квазибинарного состава, например, руд черных металлов. Предложил идею о ботанической реабилитации радиоактивно-загрязненных территорий (патент Российской Федерации с приоритетом от 15.04.1994 г.) [3].

Формирование и развитие ядерной лаборатории в вузе неразрывно связано с подготовкой инженеров-специалистов по геофизическим методам поисков и разведки месторождений радиоактивных руд и редких металлов. Для подготовки таких специалистов осенью 1953 г. на геофизическом факультете была организована специальная кафедра в составе проф. Н. А. Иванова (зав. кафедрой), асс. В. Н. Микшевича и лаборанта Н. Д. Теплых.

Неоценимую помощь в формировании и становлении ядерно-геофизического направления в те годы оказал проф. Ю. П. Булашевич, который вплоть до 1959 г. вел профилирующий курс лекций по радиоактивной разведке для студентов ядерно-геофизической специализации. Юрий Петрович Булашевич – советский и российский геофизик, автор трудов по геофизическим методам разведки полезных ископаемых, один из создателей теории нейтронного каротажа и метода вызванной поляризации. Основатель и первый директор Института геофизики УрО РАН.

С 1980 г. сотрудничал с Горным университетом Владимир Иванович Уткин, советский и российский геофизик; член-корреспондент РАН (2003), профессор (1991), заслуженный деятель науки РФ (1999); директор Института геофизики УрО РАН (1999–2004). В. И. Уткин был членом специализированных советов Института геофизики УрО РАН и Уральской государственной горно-геологической академии (ныне Уральский государственный горный университет) по защитам докторских диссертаций по специальности «Геофизика. Геофизические методы поисков и разведки полезных ископаемых». В. И. Уткин неоднократно выступал оппонентом докторских и кандидатских диссертаций по указанной специальности, читал лекции по спецкурсам студентам. С 1986 по 2004 г. В. И. Уткин руководил лабораторией ядерной геофизики в Институте геофизики УрО РАН.

Лаборатория радиометрии и ядерной геофизики является базой для выполнения исследовательских работ. На геофизическом факультете УГГУ подготовлено более тысячи инженеров – специалистов по ядерным методам в разведочной геофизике, десятки из них стали кандидатами и докторами наук.

Большую помощь лаборатории радиометрии и ядерной геофизики оказывает ООО НПП «Энергия» в лице выпускников кафедры – основателей компании – директора по науке д-ра техн. наук В. Г. Черменского и директора по развитию бизнеса С. Л. Бутолина.

Лаборатория каротажа и петрофизики Козырина Анатолия Константиновича

КОЗЫРИН Анатолий Константинович (20.10.1917 – 26.04.2008) в 1947 г. окончил Свердловский горный институт по специальности «Геофизические методы разведки», д-р геол.-минерал. наук, профессор, Заслуженный деятель науки и техники РФ. Почетный разведчик недр, специалист в области каротажа, скважинной геофизики и электроразведки. Внес большой вклад в разработку теоретических основ скважинной электроразведки постоянным током, метода электрической корреляции, теории и методики одноэлектродного каротажа, комплекса методов с использованием бурильных труб (фото 22, 23).

Все 90 лет жизни А. К. Козырина были трудными и героическими. Он родился 20 октября 1917 г. в семье горного десятника на Черноисточинских платиновых приисках. В 1936 г. с отличием окончил школу-десятилетку в г. Кушве и поступил на физико-математический факультет Уральского университета, в 1939 г. перевелся на геологоразведочный факультет Свердловского горного института. В 1941 г. Анатолий Константинович добровольцем ушел на фронт. Воевал на Северо-Западном фронте, командовал пулеметным взводом. Награжден орденом Красного Знамени и орденом Отечественной войны первой степени. В боях под Старой Руссой в феврале 1943 г. гвардии лейтенант Козырин был тяжело ранен, лишился обеих ног. Пришлось начинать жизнь

Фото 22. Анатолий Константинович Козырин

Фото 23. А. Б. Поляков, В. Н. Микшевич, Н. Д. Теплых, А. К. Козырин на привале

сначала и с гораздо меньшими возможностями, чем у других.

После выписки из госпиталя Анатолий Константинович восстановился в числе студентов Свердловского горного института, который и окончил с отличием в 1947 г. по специальности «Геофизические методы разведки». Был оставлен для работы в научно-исследовательском секторе института. На костылях мотался по геологоразведочным партиям – внедрял электрический каротаж на угольных месторождениях Урала. В 1951 г. защитил кандидатскую диссертацию и перешел на преподавательскую работу. Сначала читал курс сейсморазведки, потом подготовил первый в Горном институте курс «Геофизические методы исследования скважин» и читал его студентам около 50 лет. Читал, стоя на протезе и опираясь рукой о стол. Кроме курса ГИС Анатолий Константинович читал еще «Теорию методов ГИС» и «Комплексирование ГИС». Лекции А. К. Козырина всегда отличались очень четким математическим обоснованием и прекрасным литературным языком.

Занимаясь преподавательской работой, Анатолий Константинович не прекращал и научных исследований. Он являлся одним из основоположников скважинной геофизики. Им разработан метод электрической корреляции разрезов скважин, который нашел применение на территории нашей страны и за рубежом. Он участвовал в разведке Молодежного, Узельгинского колчеданных месторождений. Занимался разработкой методов ГИС, реализуемых с использованием колонны бурильных труб. В 1967 г. А. К. Козырин защитил докторскую диссертацию, в 1969 г. стал профессором [3].

Совместно с профессором Г. П. Саковцевым организовал на геофизическом факультете СГИ подготовку инженеров по специализации «Геофизические исследования скважин», на основе которой в 2000 г. в институте была открыта новая специальность с тем же названием.

За время преподавательской работы проф. А. К. Козырин обучил несколько тысяч студентов, под его руководством 11 человек защитили кандидатские диссертации, 4 из них впоследствии стали докторами наук. Научная и преподавательская деятельность проф. А. К. Козырина отмечена почетным званием «Заслуженный деятель науки и техники Российской Федерации», медалями «За трудовое отличие» и «За доблестный труд», знаком «Отличник разведки недр», многочисленными почетными грамотами.

В настоящее время геофизические исследования скважин – это мощная отрасль разведочной геофизики, имеющая свою теорию, очень специфичную технологию, разнообразную и сложную скважинную аппаратуру, системы обработки и интерпретации данных. Развитие ГИС в нашем вузе неразрывно связано с именем А. К. Козырина. Именно А. К. Козыриным был создан первый самостоятельный и законченный курс по геофизическим исследованиям скважин, называвшийся в то время «буровой геофизикой» и включавший в себя не только электрический каротаж, но и гамма-каротаж и операции по изучению технического состояния скважин.

Профессором А. К. Козыриным был разработан, проверен в реальных условиях и широко внедрен в практику метод электрической корреляции (МЭК), ставший одним из ведущих методов скважинной электроразведки. К его же разработкам относятся метод поисков колчеданных месторождений с помощью скважинной резистивиметрии, одноэлектродный каротаж на кабеле (совместно с Н. В. Блинковой) и на бурильных трубах (совместно с А. И. Минцевым), МЭК по промышленным помехам, метод электродных потенциалов (МЭП) сухих скважин и пр.

Многие из наших выпускников достигли заметных успехов на поприще ГИС, причем не только те, кто специализировался в этом направлении, но и те, чья вузовская

подготовка по этому направлению ограничивалась общим курсом ГИС. В числе таких отличившихся выпускников А. Н. Авдонин, В. М. Сапожников, И. Г. Сковородников, В. А. Ленский, А. М. Мухаметшин, Ю. В. Голиков, Г. В. Иголкина.

Большую помощь в оснащении оборудованием лаборатории каротажа оказывает АО НПП «ВНИИГИС» (директора – В. Т. Перелыгин и А. А. Сергеев).

Лаборатория радиационного контроля Микшевича Владислава Николаевича

МИКШЕВИЧ Владислав Николаевич (08.03.1920 – 24.11.2001) в 1943 г. окончил Свердловский горный институт по специальности «Геофизические методы разведки», специалист в области разведочной геофизики и геофизических методов опробования руд (фото 24).

Владислав Николаевич Микшевич родился 8 марта 1920 г. в г. Воткинске Удмуртской АССР. Окончил в 1938 г. 10 классов и поступил учиться в Свердловский горный институт (СГИ). В 1943 г., окончив институт и получив диплом горного инженера-геофизика, был направлен для работы в трест «Башнефтегеофизика», где занимался поисками и разведкой нефтяных месторождений с использованием гравимагнитных методов в Свердловской, Пермской и Оренбургской областях, на юге Башкирии и в Северном Казахстане сначала в должности инженера-оператора, а затем – начальника геофизической партии.

В 1950 г. был зачислен в производственный отдел треста на должность старшего инженера по гравиметрии и магнитометрии. В этом же году подал заявление в СГИ на конкурс по замещению должности ассистента кафедры геофизики геофизического факультета, прошел по конкурсу и был зачислен в штат. В скором времени в институте открылась новая специальность по подготовке инженеров-геофизиков для поисков и разведки руд радиоактивных и редких металлов. На вновь образованной кафедре, названной кафедрой рудной геофизики, работал в качестве ассистента. С 1952 по 1956 г. был и. о. заведующего кафедрой.

В мае 1956 г. был откомандирован в распоряжение советско-китайского предприятия и зачислен на должность главного геофизика управления 182-й экспедиции, занимавшейся поисками и разведкой урановых руд, руд редких и радиоактивных элементов в Китайской Народной Республике (КНР). В январе 1959 г. вернулся в Советский Союз и вновь был отправлен в командировку в КНР,

Фото 24. Владислав Николаевич Микшевич

Фото 25. В горах Тибета. Эдельвейсы

Фото 26. Китайские геофизики Чжоу-Гуан-Тянь, Сю-Ин, Куай-Сянь-Цзинь с советскими специалистами В. Микшевичем и Е. Микшевич

в город Нанкин (Нанкинский университет) для организации занятий и чтения лекций по радиометрии на старших курсах слушателей университета с использованием материалов, полученных в результате работ в КНР, за что и был награжден Значком профессора Нанкинского университета (фото 25, 26) [5].

Вернувшись из Нанкина в декабре 1959 г., продолжил работу ассистентом кафедры рудной геофизики, затем старшим преподавателем, доцентом. С 1960 по 1988 г. вел научно-исследовательскую работу в качестве научного руководителя комплексных геофизических исследований на Качканарском месторождении титаномагнетитовых руд. В 1972 г. ВАК присвоил ему ученое звание доцента.

В процессе выполнения учебной работы подготовил и вел курсы лекций по «Дозиметрии», «Радиометрии», «Комплексированию геофизических методов при поисках руд редких и радиоактивных элементов», «Магниторазведке», «Методам радиоактивной разведке», «Радиоактивной и ядерной геофизике».

В. Н. Микшевич внес значительный вклад в разработку и внедрение в производство ядерно-физических методов с целью поисков и разведки руд редких и радиоактивных элементов. Автор более 60 опубликованных работ. Награжден медалями «За доблестный труд в Великой Отечественной войне 1941–1945 гг.», «За доблестный труд. В ознаменование 100-летия со дня рождения В. И. Ленина», юбилейной медалью «За победу над Германией в Великой Отечественной войне 1941–1945 гг.». За работу в КНР Госсоветом КНР награжден двумя медалями «Китайско-советской дружбы» за оказание помощи в развитии промышленности и развитии науки и высшего образования Китайской Народной Республики.

Лаборатория радиационного контроля создана в 1994 г. В ее основании участвовали Т. А. Глушкова, С. А. Игумнов, И. Б. Буров, В. Н. Микшевич, Е. Л. Семченко, А. Г. Талалай, А. А. Чугунов, В. И. Уткин, В. И. Фоминых (фото 27). За это время исследованы сотни объектов окружающей среды, многие из которых оказались очень опасными. В 2018 г. было проведено переоснащение лаборатории и ей присвоено имя В. Н. Микшевича.

Лаборатория информационных систем и радиоэлектроники Кучурина Евгения Сергеевича

КУЧУРИН Евгений Сергеевич (30.08.1946 – 10.05.2004) в 1969 г. окончил Свердловский горный институт по специальности «Геофизические методы поисков и

Фото 27. Коллектив Института испытаний и сертификации минерального сырья. 1998 г.

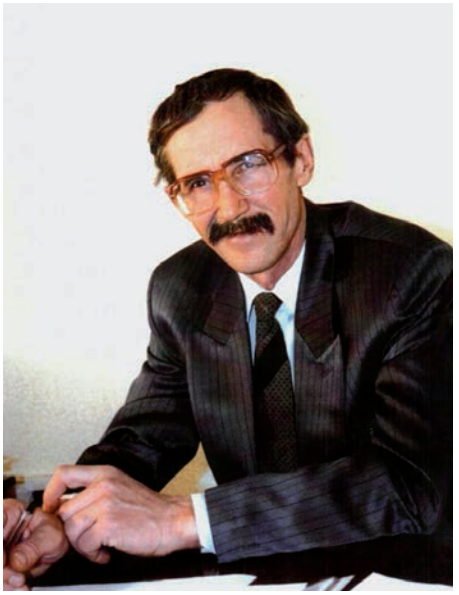


Фото 28. Евгений Сергеевич Кучурин

разведки месторождений полезных ископаемых», специалист в области геофизических методов исследований скважин, д-р геол.-минерал. наук (фото 28, 29).

Основные труды посвящены вопросам исследования скважин при изучении нефтяных рудных и угольных месторождений с применением источников ионизирующего гамма- и нейтронного излучения. Разрабатывал многоканальные системы измерения для изучения энергетического состава и закономерностей пространственно-временного распределения гамма-квантов, тепловых и надтепловых нейтронов. Создал способы количественного определения элементного состава и физических свойств горных пород, руд и угля в скважинах путем изучения спектров наведенной активности, радиационного захвата, неупругого рассеяния быстрых нейтронов, рентгеновского и рассеянного гамма-излучения. Разработал комплексные технологии для дистанционного контроля и оценки текущих нефте- и водонасыщенных пластов по данным импульсного нейтрон-нейтронного и углеродно-кислородного каротажа, помехоустойчивые методики количественного определения содержания в пластах радиационно активных элементов, технологии создания наведенной активности с циклическим облучением и измерением вторичных эффектов. Предложил принципиально новые модели гамма-гамма-каротажа и разработал одно- и многозондовые приборы, компенсирующие влияние скважин и промежуточных сред (обсадная колонна, цемент и др.) [3, 6].

Член Научно-методического совета по геолого-геофизическим технологиям, Европейско-Азиатского геофизического общества, директор Башкирского филиала ассоциации «Ядерная геофизика».

Подготовил 5 кандидатов наук. Лауреат премии Ленинского комсомола Забайкалья (1980). Автор и соавтор более 200 опубликованных работ. Имеет 80 авторских свидетельств на изобретения и патентов СССР и РФ.

В Уральском горном университете отреставрирован Храм Николая Чудотворца. «Звоны» для него были отлиты в Каменске-Уральском на колокольном заводе Пяткова Николая, состоялось их освящение. Самый большой колокол весом 346 кг и диаметром 820 мм опоясан памятной надписью, сообщающей, что изготовлен он на средства выпускников института (фото 30). Вязью отлито здесь имя геофизика Евгения Кучурина, много сделавшего для исследования месторождений полезных ископаемых и

Фото 29. Обсуждение на рабочей площадке, г. Октябрьский, ВНИИГИС. 1991 г. (Е. С. Кучурин – в центре)

Фото 30. Колокол в Храме УГГУ с именем Е. С. Кучурина

безвременно ушедшего из жизни. Поклонившись памяти Евгения, выпускники института вспомнят и других однокашников, не вернувшихся с фронтов Великой Отечественной, из таежных маршрутов, из горных выработок.

22 ноября 2004 г. в дни Уральского горного университета зазвонили все семь колоколов, а звон большого колокола, который созвучен басу Евгения Сергеевича Кучурина, мы долгие годы будем слышать на уральской земле.

Лаборатория радиоэлектроники (радиотехники) была создана в 1952–1953 гг. Это было время, когда транзисторы еще не производились и вся электроника базировалась на электронных лампах. К 1957 г. в лаборатории имелись три осциллографа (ЭО-5, ЭО-6 и ЭО-7), два низкочастотных генератора ЗГ-10, высокочастотный генератор ГСС-6, два стабилизированных выпрямителя ВС-И для питания ламповых схем и тестеры Ц-20. Кроме того, в лаборатории были в единичных экземплярах резонансный и гетеродинный частотомеры, а также измеритель добротности колебательных контуров – Q-метр и измерительный мост переменного тока.

Лабораторные работы выполнились на стендах, выполненных из многослойной фанеры, на которой размещались ламповые панели, радиодетали и соединительные провода. Выведенные контрольные точки позволяли измерять режимы работы устройств и наблюдать форму сигналов на экране электронного осциллографа. Кроме того, студенты самостоятельно собирали (паяли) одноламповые усилители низкой частоты и, подключая к ним колебательный контур с детектором и наушники, получали возможность принимать сигналы местной длинноволновой радиостанции. В подготовке лабораторных работ, проводимой под общим руководством М. Х. Мухамедзяна, принимали участие молодые преподаватели кафедры – ассистенты Г. С. Возженников, А. С. Серых, В. В. Литвишко и М. Т. Исупова. Из-за недостаточного количества аппаратуры лабораторные работы выполнялись крупными бригадами по скользящему графику, так что иногда приходилось выполнять работы по теме, еще не прочитанной лектором.

В 1960 г. курс радиотехники был передан выпускнику группы РФ-54-2 С. А. Игумнову, который и занялся воссозданием и дальнейшим развитием лаборатории. В 1960–1962 гг. были оборудованы лабораторные столы с блоками питания, изготовлены шасси с укрепленными на них ламповыми панельками и монтажными лепестками, на которых студенты могли самостоятельно собирать электронные схемы. В учебном плане тех лет на курс радиотехники и электроники отводилось примерно вдвое больше аудиторного времени, чем в настоящее время. Это позволяло вводить в программу лабораторного практикума значительное количество работ, связанных с самостоятельной сборкой электронных схем. Учащиеся получали навыки составления монтажных схем, пайки и налаживания электронных устройств, порой достаточно сложных. Так, для студентов, специализирующихся на поисках месторождений урана, зачетной работой была сборка радиометра.

Ж. Н. Александрова и др. Путь длиною в век: от лаборатории магнитометрии до кафедры геофизики Уральского государственного горного университета//Известия УГГУ. 2024. Вып. 1(73). С. 193–211. DOI 10.21440/2307-2091-2024-1-193-211

Фото 31. Въезд на базу учебной практики в пос. В. Сысерть

Фото 32. Преподаватели на учебной геофизической практике в В. Сысерти: В. В. Филатов, Г. В. Шилина, А. В. Алексеев, Ж. Н. Александрова, Н. В. Блинкова, С. И. Шаров, И. Г. Сковородников, Н. Л. Андреев, С. С. Сысков. 2003 г.

К середине 1970-х гг. все рабочие места были оборудованы блоками питания для ламповых и транзисторных схем, генераторами звуковых и ультразвуковых колебаний ГЗ-33, импульсными генераторами Г5-15, ламповыми вольтметрами.

В 1985 г. произошло объединение курсов электротехники и радиотехники в единый курс. Возникла потребность в постановке работ по электрическим цепям. Для выполнения этих работ были разработаны универсальные штепсельные платы, позволяющие собирать требуемые схемы из готовых элементов, вставляемых в штепсельные гнезда. В связи с переходом электроники на интегральную схемотехнику с широким использованием цифровых устройств были изготовлены сменные блоки, позволяющие собирать на универсальной плате устройства с использованием операционных усилителей, логических схем, регистров, счетчиков и т. д.

Сейчас лаборатория по-прежнему обслуживает учебные занятия студентов-геофизиков очного и заочного обучения. При лаборатории действует Студенческая творческая лаборатория «Спектр».

Геофизическое образование неразрывно связано с общеобразовательными кафедрами: высшей математики (зав. каф. И. С. Гельфанд), физики (зав. каф. И. К. Овчинников), иностранных языков (зав. каф. П. Ф. Забелин), геоинформатики (зав. каф. В. Б. Писецкий) и недропользования (зав. каф. Н. А. Сергеева).

Качественная подготовка специалистов и магистров геофизической специальности, отвечающая требованиям геологоразведочного процесса, невозможна без учебной и производственной практик, которые позволяют развивать и закреплять знания, умения и навыки, полученные на аудиторных занятиях. Студенты учатся «видеть» и интерпретировать природу процессов, приобретают профессиональные навыки решения практических задач.

Для прохождения учебных практик имеются базы геодезической, геологической и геофизической практик.

Учебная геофизическая практика

База учебной геофизической практики в Уральском государственном горном университете была создана в 1963 г. в поселке Верхняя Сысерть. Благоприятные физико-геологические предпосылки, наличие нескольких учебных скважин и хорошая геологическая изученность (геологическая карта масштаба 1 : 10 000) района базы позволяют проводить здесь практику по всем основным геофизическим методам для специальностей «Геофизические методы поисков и разведки месторождений полезных ископаемых» (РФ), «Геофизические методы исследования скважин» (ГИС), «Поиски и разведка подземных вод и инженерно-геологические изыскания» (ГИГГ) (фото 31, 32) [7].

Главным инициатором создания базы геофизической практики в поселке Верхняя Сысерть был ректор Свердловского горного института, зав. кафедрой рудной геофизики Глеб Павлович Саковцев. Первый приказ по практике звучал так: «Организовать проведение учебно-методической геофизической практики для студентов геофизической и геологической специальностей по всем геофизическим методам на Верхне-Сысертской базе в период с 24 мая по 26 июня 1963 г.». В 1963 г. база еще строилась. Глеб Павлович, как полководец, бросал в строительный бой бригады плотников, электриков, маляров, печников, гнал машины со строительными материалами и студенческие отряды. Еще не было построено общежитие, и большинство студентов жило в палатках. За первые два года на базе построили дом для семьи коменданта, шесть коттеджей-лабораторий по числу геофизических разведок, общежитие для студентов и столовую. Кухонная печь топилась дровами, воду для столовой возили в бочке из родника, а для умывальников – из пруда. Через двадцать лет на базе возвели двухэтажный дом, позже вдоль северной стороны территории базы была прирезана полоска земли шириною 10–15 м и на ней построили несколько 2- и 3-комнатных летних домиков; в начале 1990-х гг. еще севернее появилась анклавная территория с десятью капитальными деревянными домами с печным отоплением. Так что сейчас все приезжающие живут под железными или шиферными крышами [7].

Открывая базу, Глеб Павлович Саковцев дал такой наказ своим коллегам по факультету: «Везите с собой на базу своих детей, пусть здесь отдыхают, подрастают и привыкают к геофизике». На протяжении нескольких десятков лет этот наказ неизменно выполняется не только преподавателями-геофизиками, но и многими преподавателями и сотрудниками всего университета, для которых база все эти годы исправно служит местом летнего отдыха для них самих, их детей и внуков. База не только поставляет дары природы и позволяет поправить здоровье, но и дарит роскошь человеческого общения!

Заключение

Особую гордость представляют наши выпускники, которые трудятся во всех уголках страны, ближнего и дальнего зарубежья. Многие стали ведущими специалистами, внесли значительный вклад в развитие геофизической науки, благодаря которым было открыто (возглавлено) на территории СССР более 15 кафедр геофизики (К. Н. Ансимов, В. И. Бондарев, А. П. Булмасов, Г.С. Вахромеев, С.И. Восанчук, В.Н. Головцын, Н.Б. Дортман, А. Г. Карелин, Е. М. Квятковский, Д. С. Миков, А. А. Непомнящих, И. Л. Никольский, Г. Ф. Новиков, Б. П. Притчин, В. М. Слукин, И. М. Хомяков, А. А. Юньков и др.) – это тысячи подготовленных специалистов.

Уникальные отношения сложились с Академией наук СССР (России) – Институт геологии и геохимии, Институт геофизики, Институт горного дела, Институт промышленной экологии – сотни наших выпускников работают в академических и прикладных институтах.

Тесная и глубокая связь школы и производства подтверждена контрактами с АО «Центральная геофизическая экспедиция», ОАО «Хантымансийскгеофизика», АО «ПГО «Тюменьпромгеофизика», АО «Башнефтгеофизика», ООО «ТНГ-Групп», АО НПП «ВНИИГИС», ООО «НПП Энергия», ЗАО НПФ «Эликом», ООО НПП «ИНГЕО», АО НПФ «ГИТАС», Группа компаний «РосГеоПерспектива», ООО НижГеоКомплект», ООО «Мегацентр-плюс», Группа компаний «НЕДРА» и др.

Пройти вековой путь от лаборатории магнитометрии до кафедры геофизики помогли педагогические принципы П. К. Соболевского: «Учить надо рассказом и показом» и «Учи, учись и не отрывайся от производства и живой природы», которые актуальны и по сей день.

ЛИТЕРАТУРА

1. Филатов В. В. «Отечества пользы для…» (75 лет Уральскому горному институту. 1917–1992). Екатеринбург: УГИ, 1992. 408 с.
2. Филатов В. В. Уральская геофизическая школа (60 лет геофизическому факультету Уральского государственного горного университета. 1951–2011 гг.: биограф. справочник. 2-е изд. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2011. 461 с.
3. Филатов В. В. Профессора Уральского государственного горного университета: биограф. справочник. 4-е изд. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2009. 479 с.
4. Геофизика XXI века: материалы симпоз., посвящ. 50-летию образования геофиз. факультета Уральской государственной горно-геологической академии, 22–25 октября 2001 г. Екатеринбург: УГГГА, 2001. 341 с.
5. Микшевич В. Н. Воспоминания (посвящается 100-летию со дня рождения). Екатеринбург, 2020. 162 с.
6. Институт геологии и геофизики Уральской государственной горно-геологической академии. Екатеринбург: УГГГА, 2002. 282 с.
7. Учебная геофизическая практика в Уральской государственной горно-геологической академии / под ред. В. В. Филатова. Екатеринбург: Изд-во УГГГА, 2003. 258 с.

Статья поступила в редакцию 21 сентября 2023 года

Уважаемые авторы!

Журнал «Известия УГГУ» публикует результаты научных исследований российских и зарубежных авторов на русском или английском языках.

К рассмотрению принимаются рукописи, снабженные следующими необходимыми компонентами.

1. Текст статьи на русском или английском языке (либо двуязычный) в электронном виде. Статьи принимаются на электронную почту редакции: **iuggu-journal@yandex.ru** либо при помощи электронной редакции на сайте iuggu.ru. Не допускается направление в редакцию статей, уже публиковавшихся или посланных на публикацию в другие журналы. Необходимо указывать номер УДК.

2. Аннотация и ключевые слова. Объем аннотации должен составлять 200–250 слов, ключевых слов должно быть не менее 5. По аннотации читатель должен определить, стоит ли обращаться к полному тексту статьи для получения более подробной, интересующей его информации. Стоит воздержаться от второстепенной информации и выражать мысли возможно более лаконично.

В аннотации должны быть четко прописаны: актуальность, цель работы, метод или методология проведения работы, результаты работы и область их применения; выводы (при необходимости).

Текст статьи должен быть структурирован в соответствии с аннотацией и содержать конкретные разделы: введение, результаты и их применение, выводы (при необходимости), заключение.

Перевод аннотации, ключевых слов и списка литературы на английский язык осуществляется авторами, только если они уверены в качестве перевода, если же нет – перевод осуществляется редакцией. Перевод с помощью электронных переводчиков не принимается.

3. Список литературы на русском и английском языках. Ссылки на источники должны идти в тексте по порядку – 1, 2, 3. В тексте ссылки заключаются в квадратные скобки. Количество ссылок в тексте должно соответствовать количеству источников литературы в списке. Упоминания ГОСТ, СНиП, правил безопасности, нормативных, законодательных и других документов, отчетов о НИР, а также ссылок на неофициальные источники в Интернет необходимо приводить в тексте статьи или в сносках, не вынося в список литературы. Обязательно отражение в статье мирового опыта по рассматриваемому вопросу, список литературы должен содержать современные зарубежные статьи (не ранее 2013 года издания). Список литературы должен содержать не менее 15 источников, из которых должно быть не более 2 собственных работ автора. Наличие в списке литературы учебников, учебных и методических пособий, указаний по курсовому и дипломному проектированию, конспектов лекций для студентов не допускается.

При оформлении списка литературы у ВСЕХ публикаций, имеющих DOI (особенно это касается иностранных публикаций), эти DOI должны быть указаны (в виде гиперссылок). Пример оформления: 10. Henry D. J., Novák M., Hawthorne F. C., Ertl A., Dutrow B. L., Uher P., Pezzotta F. Nomenclature of the tourmaline-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 // Известия вузов. Горный журнал. 2014. № 6. С. 160–168.

Авторефераты, диссертации

Овечкина О. Н. Оценка и прогноз изменения состояния геологической среды при техногенном воздействии зданий высотной конструкции в пределах города Екатеринбурга: автореф. … дис. канд. геол.-минерал. наук. Екатеринбург: УГГУ, 2013. 24 с.

Сушко А. Е. Разработка специального математического и программного обеспечения для автоматизированной диагностики сложных систем: дис. … канд. техн. наук. М.: МИФИ, 2007. 170 с.

Зарубежные исследования

Hudson J. A. The Scattering of Elastic Waves by Granular Media. Quart Journal Mech. and 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 странице каждого нового выпуска. Здесь мы не будем повторять все это, лишь расскажем о нововведениях, которые нам представляются наиболее важными.

Аннотация. Как на русском, так и на английском языках аннотации сейчас принимаются только расширенные – не менее 200 слов. Делается это для того, чтобы читатель (в том числе иностранный) мог в считанные минуты понять, о чем данная статья и представляет ли она для него интерес.

Список литературы. К сожалению, публикации в советских журналах традиционно отличались от иностранных меньшим числом источников. Кроме того, отечественные ученые зачастую не утруждают себя изучением иностранных публикаций на интересующую тему. Также часты использования в качестве источников различных учебников, методичек и пр. Все это значительно снижает уровень публикаций. Поэтому мы взяли за правило рекомендовать авторам расширять список литературы до 10–15 источников с обязательным использованием современных зарубежных публикаций. Исключения возможны, но они должны быть обоснованными.

DOI. Помимо ставшего уже привычным для авторов присваиваемого каждой статье номера УДК, начиная со второго номера 2016 года каждой статье в обязательном порядке присваивается номер DOI.

DOI (*англ.* Digital object identification) – классификатор цифрового объекта для создания постоянных гиперссылок, которые позволяют сохранять информацию о конкретной статье в сети Интернет, даже если изменилась структура сайта, где эта статья изначально была сохранена.

Проще говоря, номер DOI позволяет научной статье гарантированно открываться и быть доступной для поиска в сети, что совершенно необходимо для того, чтобы статья могла цитироваться с помощью Интернета, не затрудняя авторов поисками ее в библиотеках и архивах – своего рода дань современным IT-технологиям.

Редакцией «Известий УГГУ» заключен договор с ООО «НЭИКОН ИСП», которое предоставляет в России посреднические услуги по присвоению DOI от регистрационного агентства (DOI Registration Agency) CrossRef. Это самый современный центр регистрации Международной организации документации, основной задачей которого является организация доступа пользователей к первичным публикациям, содержащим научный контент, и содействие коллективной работе издателей по всему миру. Эту кооперативную справочную систему сейчас используют большинство научных журналов в мире.

DOI обязательно указывается при цитировании статьи. В журнале «Известия УГГУ» DOI сейчас присваивается каждой вновь вышедшей статье. Также номер DOI может быть присвоен любой из статей, которые ранее публиковались в нашем журнале – но уже не в обязательном порядке, а по желанию авторов. Для желающих достаточно сделать заявку в редакцию.

Качество перевода. Нас не устраивает перевод аннотаций (и уж тем более – статей) с помощью электронных переводчиков. Если вы не уверены в своем переводе, лучше обратитесь за помощью в редакцию. Лучше не предоставить никакого перевода, чем перевод низкого качества.

Качество рисунков. Рисунок должен оставаться качественным при увеличении. Не забывайте о том, что статья будет опубликована не только в бумажной, но и в электронной версии.

Качество текстов. При рассмотрении рукописи авторитет и заслуги автора статьи во внимание не принимаются – только качество присланного текста. Для этого введено двойное слепое рецензирование.

Слепое рецензирование. Два рецензента оценивают качество статьи, не зная, кто ее автор. В случае, если рецензент узнает автора, то рукопись автоматически передается другому рецензенту – из числа экспертов, сотрудничающих с журналом. Делается это для того, чтобы личные отношения не влияли на качество рецензии. Автор также не знает своего рецензента.

Помимо этого, правила публикации текстов предполагают их разнообразие. Поэтому **недопустима публикация двух статей одного автора в одном номере журнала.** То же правило распространяется и на соседние номера. Так мы поддерживаем разнообразие тем и авторов, исключая превращение журнала в издание, где постоянно публикуется десяток одних и тех же авторов. Исключение составляют статьи вне научных разделов, а также статьи, продолжающиеся из номера в номер. В качестве альтернативы публикации в нашем журнале мы можем предложить автору опубликоваться в другом журнале, с которым у нас заключен договор по обмену статьями.

Очередь. Сроки публикации зависят от количества (и качества) статей, предложенных редакции. Если статей много, они публикуются в порядке очередности, однако редакция оставляет за собой право печатать вне очереди те из них, которые считает наиболее значимыми.

Автор должен также подписать согласие на использование редакцией журнала «Известия УГГУ» его персональных данных.

Известия Уральского государственного горного университета. 2024, вып. 1(73)
News of the Ural State Mining University. 2024, issue 1(73,)

На обложке: фото кальциооливина – природного аналога подногинита
On the cover: on photo calcio-olivin – a natural analogue of podnoginite

Редакция выражает благодарность за помощь в работе журнала

Баранникову Александру Григорьевичу – д-ру геол.-минерал. наук, профессору (Екатеринбург, Россия);
Карстен Луизе – Dr. rer. nat. (Ганновер, Германия);
Кожушко Герману Георгиевичу – д-ру техн. наук, профессору (Екатеринбург, Россия);
Козину Владимиру Зиновьевичу - д-ру техн. наук, профессору (Екатеринбург, Россия);
Корнилкову Сергею Викторовичу – д-ру техн. наук, профессору (Екатеринбург, Россия);
Сурневу Виктору Борисовичу – д-ру физ.-мат. наук, профессору (Екатеринбург, Россия);
Филиппову Сергею – Dr. rer. nat. (Ганновер, Германия);
Хальфину Марату Нурмухамедовичу – д-ру техн. наук, профессору (Новочеркасск, Россия)

Редакция
Главный редактор Косарев Н. П.
Заместитель главного редактора Шорин А. Г.
Ответственный секретарь Георгиева Н. В.
Редактор Парамонова Л. Ю.
Дизайнер Галактионова Е. В.
Переводчик Тараньжин Б. С.

Верстка Швецовой Ю. Б.
Корректура, оформление рисунков Пихтовниковой О. Г.

Подписано в печать 12.03.2024 г. Дата выхода в свет – 15.03.2024 г.
Формат 60 × 84/8. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 21,27. Тираж 120 экз. Заказ № 25
Цена свободная

Почтовый адрес издателя и учредителя: 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30,
ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»
Редакция: 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30, к. 1201
Тел.: (343)283-05-60
E-mail: iuggu-journal@yandex.ru
https://iuggu.ru

Отпечатано в типографии:
ООО «Издательство УМЦ УПИ»
г. Екатеринбург, ул. Гагарина, 35а, оф. 2
Тел.: (343) 362-91-16

Список научных специальностей

1.6.1. Общая и региональная геология. Геотектоника и геодинамика (геолого-минералогические науки)

1.6.2. Палеонтология и стратиграфия (геолого-минералогические; биологические науки)

1.6.3. Петрология, вулканология (геолого-минералогические науки)

1.6.4. Минералогия, кристаллография. геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых (геолого-минералогические; физико-математические; химические; технические науки)

1.6.5. Литология (геолого-минералогические науки)

1.6.6. Гидрогеология (геолого-минералогические; технические науки)

1.6.7. Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение (геолого-минералогические; географические; технические науки)

1.6.9. Геофизика (геолого-минералогические; физико-математические; технические науки)

1.6.10. Геология, поиски и разведка твердых полезных ископаемых, минерагения (геолого-минералогические; технические науки)

1.6.11. Геология, поиски, разведка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений (геолого-минералогические; технические науки)

1.6.15. Землеустройство, кадастр и мониторинг земель (географические; технические; сельскохозяйственные; экономические науки)

1.6.20. Геоинформатика, картография (географические; геолого-минералогические; технические; физико-математические науки)

1.6.21. Геоэкология (геолого-минералогические; географические; технические науки)

2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические науки)

2.6.2. Металлургия черных, цветных и редких металлов (технические науки)

2.6.4. Обработка металлов давлением (технические науки)

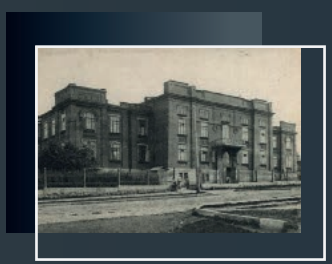
2.6.5. Порошковая металлургия и композиционные материалы (технические науки)

2.6.17. Материаловедение (технические, физико-математические, химические науки)

5.2.2. Математические, статистические и инструментальные методы в экономике (экономические; физико-математические науки)

5.2.3. Региональная и отраслевая экономика (экономические науки)
5.2.6. Менеджмент (экономические науки)

Читайте в этом номере статью Ю.В. Ерохина, Л.М. Евдокимовой, А.Г. Шорина «Аркадий Константинович Подногин (1898-1961) и бывший подногинит (ныне кальциооливин)



Первый номер журнала Уральского горного института по итогам 1918-1919 академического года был издан в 1920 году во Владивостоке под редакцией П. П. фон Веймарна

ISSN 2307-2091
Известия Уральского государственного горного университета. Вып. № 1 (73), 2024 г.