

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

ИЗВЕСТИЯ

УРАЛЬСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
ГОРНОГО
УНИВЕРСИТЕТА



Выпуск 1 (69)
2023



NEWS

OF THE URAL
STATE MINING
UNIVERSITY

Томъ I. (III-IV)

19¹⁸/₁₉ ак. г.

Volume I. (III-IV)

ИЗВѢСТІЯ
☆
УРАЛЬСКАГО
ГОРНАГО
ИНСТИТУТА
ВЪ
ЕКАТЕРИНБУРГЬ



ANNALES
DE
L'ÉCOLE 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 (69)

2023

Уральский государственный
горный университет

Известия Уральского государственного
горного университета
2023, вып. 1 (69)

Ural State
Mining University

News of the Ural State
Mining University
2023, issue 1 (69)



DOAJ DIRECTORY OF
OPEN ACCESS
JOURNALS



НАУЧНАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ
БИБЛИОТЕКА
eLIBRARY.RU



Журнал выходит 4 раза в год

Published 4 times a year

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.

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

We accept for publication articles in Russian and English languages.

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

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

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

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

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

Учредитель и издатель

УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Главный редактор

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

Заместитель главного редактора

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

Ученый секретарь

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

Редакционная коллегия

МАКАРОВ А. Б. – д-р геол.-минерал. наук, проф., Уральский государственный горный университет
АБАТУРОВА И. В. – д-р геол.-минерал. наук, проф., Уральский государственный горный университет
ВАЛИЕВ Н. Г. – д-р техн. наук, проф., Уральский государственный горный университет
ГОЛИК В. И. – д-р техн. наук, проф., Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет)
ГОРДЕЕВ В. А. – д-р техн. наук, проф., Кубанский государственный технологический университет
ГРЕВЦЕВ Н. В. – д-р геол.-минерал. наук, проф., Уральский государственный горный университет
ГУМАН О. М. – д-р геол.-минерал. наук, проф., член Российской Академии Естествознания
ДАВЫДОВ В. А. – д-р геол.-минерал. наук, проф., Институт геофизики им. Ю. П. Булашевича УрО РАН
ДАШКО Р. Э. – д-р геолого-минералогических наук, проф., Санкт-Петербургский горный университет
ДУШИН В. А. – д-р геол.-минерал. наук, проф., Уральский государственный горный университет
ЖАБКО А. В. – д-р техн. наук, проф., Уральский государственный горный университет
ЗОТОВ А. Н. – д-р техн. наук, проф., Уфимский государственный нефтяной технический университет
ИВАНОВ К. С. – д-р геол.-минерал. наук, проф., Институт геологии и геохимии им. акад. А. Н. Заварицкого УрО РАН
ИГОЛКИНА Г. В. – д-р геол.-минерал. наук, проф., Институт геофизики им. Ю. П. Булашевича УрО РАН
КОЗЛОВ П. С. – д-р геол.-минерал. наук, проф., Институт геологии и геохимии им. акад. А. Н. Заварицкого УрО РАН
МАЛИЧ К. Н. – д-р геол.-минерал. наук, проф., Институт геологии и геохимии им. акад. А. Н. Заварицкого УрО РАН
МУРЗИН В. В. – д-р геол.-минерал. наук, проф., Институт геологии и геохимии им. акад. А. Н. Заварицкого УрО РАН
НАУМОВ В. А. – д-р геол.-минерал. наук, проф., 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. ГХОНЕИМ – асс. проф. геохимии, Агентство по атомной энергетике, Каир, Египет
МЕРКЛЕ Р. К. В. – Dr, Prof., Университет Претории, Претория, Южная Африка
САДОВЕНКО И. А. – д-р техн. наук, проф., Национальный горный университет, Днепр, Украина
БУИ С. Н. – Dr.-Ing., ассоц. проф., проректор, Ханойский университет горного дела и геологии, Ханой, Вьетнам
ВЕКСЛЕР Ю. А. – Dr.-Ing.habil, Prof., Marco Systemanalyse und Entwicklung GmbH, Дахау, Германия
ДРЕБЕНШТЕДТ К. – Prof., Dr.-Ing., Фрайбергская горная академия, Фрайберг, Германия
ИЛИАШ Н. – Dr of Technical Science, Prof., Петрошанский университет, Петрошань, Румыния
МОРКУН В. С. – д-р техн. наук, профессор, проректор по научной работе, Криворожский национальный университет, Кривой Рог, Украина
САКСЕНХОФЕР Р. Ф. – Univ.-Prof., Mag.reg.nat., Dr.mont., Горный университет Леобена, Леобен, Австрия
ФЕРРЕРО А. М. – PhD, Туринский университет, Турин, Италия
СЯО Ф. – PhD, Prof., Хэйлунцзянский университет науки и технологии, Харбин, Китай
ТАМБОВЦЕВА Т. Т. – д-р экон. наук, ассоц. профессор, Рижский технический университет, Рига, Латвия
РАДА Е. К. – Dr, Prof., Университет Инсубрии, Варесе, Италия

Founder and publisher

URAL STATE MINING UNIVERSITY

Editor-in-Chief

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

Deputy Editor-in-Chief

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

Academic Secretary

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

Editorial board

A. B. MAKAROV, Dr, Prof., Ural State Mining University
I. V. ABATUROVA, Dr, Prof., Ural State Mining University
N. G. VALIEV, Dr, Prof., Ural State Mining University
V. I. GOLIK, Dr, Prof., North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University)
V. A. GORDEEV, Dr, Prof., Kuban State Technological University
N. V. GREVTSEV, Dr, Prof., Ural State Mining University
O. M. GUMAN, Dr, Prof., member of Russian Academy of Natural Sciences
V. A. DAVYDOV, Dr, Prof., Bulashevich Institute of Geophysics of the Ural Branch of RAS
R. E. DASHKO, Dr, Prof., Saint Petersburg Mining University
V. A. DUSHUN, Dr, Prof., Ural State Mining University
A. V. ZHABKO, Dr, Prof., Ural State Mining University
A. N. ZOTOV, Dr, Prof., Ufa State Petroleum Technological University
K. S. IVANOV, Dr, Prof., The Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of RAS
G. V. IGOLKINA, Dr, Prof., Bulashevich Institute of Geophysics of the Ural Branch of RAS
P. S. KOZLOV, Dr, Prof., The Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of RAS
K. N. MALICH, Dr, Prof., The Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of RAS
V. V. MURZIN, 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 GbH, *Dachau, Germany*
C. DREBENSTEDT, Prof., Dr.-Ing., Technical University Bergakademie, *Freiberg, Germany*
N. ILIAS, Dr, Prof., Universitatea din Petrosani, *Petrosani, Romania*
V. S. MORKUN, Dr, Prof., Vice-Rector for scientific work, Kryvyi Rih National University, *Krivoy Rog, Ukraine*
R. F. SACHSENHOFER, Mag.rer.nat., Dr.mont., Univ.-Professor, University of Leoben, *Leoben, Austria*
A.-M. FERRERO, PhD, University of Turin, *Turin, Italy*
F. XIAO, PhD, Prof., Heilongjiang University of Science and Technology, *Harbin, China*
T. T. TAMBOVCEVA, Dr, Assoc Prof., Riga Technical University, *Riga, Latvia*
E. C. RADA, Dr, Prof., Insubria University, *Varese, Italy*

СОДЕРЖАНИЕ

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

- Изменение климата и нехватка водных ресурсов в Алжире**
И. Е. Зердуми, В. Ю. Абрамов
(In English)
- Фосфатная минерализация в лейкогранитах Пешчернинского штока (Рефтинский массив, Средний урал)**
Д. Д. Коровин
(In English)
- Сылвенский комплекс флюидолитов Юрюзано-Сылвенской депрессии (Свердловская область)**
В. А. Душин, Д. И. Прокопчук, С. Г. Сустанов, А. К. Трутнев, Е. А. Жулкин
- Методика оценки напряженного состояния горного массива многокомпонентным датчиком смещений методом overcoring**
Н. А. Беляков, И. А. Емельянов
- Использование мелких фракций отходов каменных карьеров Азербайджана в качестве песка при приготовлении бетонов**
Н. Г. Валиев, З. Д. Эфендиева, Т. Р. Османлы
- Песчаные интрузии в палеогеновых отложениях Ульяновско-Сызранского Поволжья (восток Русской плиты)**
Н. И. Афанасьева, С. О. Зорина, К. И. Никашин, Н. Хамата
- Применение линеаментно-геодинамического анализа для оценки карстоопасности на примере трассы нефтепровода Чаянда-ВСТО**
Д. А. Нечаев
- Анализ влияния рейтинговых методик оценивания массива на его физико-механические характеристики и на расчет крепи вертикального ствола**
П. А. Деменков, Д. А. Котиков, Е. Л. Романова
- Анализ основных факторов, определяющих значение удельного дебита водозаборной скважины**
Ю. О. Русакова, А. Г. Плавник, М. В. Вашурина, А. Л. Храмова
- Геомеханические аспекты выбора технологии подземной разработки месторождения**
А. В. Сахнов, О. З. Габараев
- Распределение и накопление тяжелых металлов в ландшафтной катене водосбора и донных отложениях водоема на урбанизированной территории**
А. А. Селезнев, Т. Г. Окунева, И. В. Ярмошенко, Г. П. Малиновский, Д. В. Киселева

CONTENTS

EARTH SCIENCES

- 7 **Climate change and scarcity of water resources in Algeria**
I. E. Zerdoumi, V. Yu. Abramov
(In English)
- 13 **Phosphate mineralization in leucogranites of the Peshcherninsky stock (Reftinsky massif, Middle Urals)**
D. D. Korovin
(In English)
- 22 **Sylvensky fluidolite complex of the Yuryuzano-Sylyven depression (Sverdlovsk region)**
V. A. Dushin, D. I. Prokopchuk, S. G. Sustavov, A. K. Trutnev, E. A. Zhuklin
- 31 **Technique for assessing the stress state of a rock mass by a multicomponent displacement sensor using the overcoring method**
N. A. Belyakov, I. A. Emel'yanov
- 39 **The use of fine fractions of waste from stone quarries in Azerbaijan as sand in the preparation of concrete**
N. G. Valiev, Z. D. Afandieva, T. R. Osmanly
- 46 **Paleogene sand injectites of the Uljanovsk-Syzran Volga region (eastern Russian platform)**
N. I. Afanas'eva, S. O. Zorina, K. I. Nikashin, N. Khamada
- 57 **Application of lineament-geodynamic analysis for assessment of karst hazard on the example of the Chayanda-ESPO oil pipeline route**
D. A. Nechaev
- 67 **Analysis of the impact of rating methods for assessing the rock mass on its physical and mechanical characteristics and on the calculation of the support of a vertical shaft**
P. A. Demenkov, D. A. Kotikov, E. L. Romanova
- 78 **Analysis of the main factors determining the value of the specific flow rate of a water well**
Yu. O. Rusakova, A. G. Plavnik, M. V. Vashurina, A. L. Khramtsova
- 88 **Geomechanical aspects of the choice of underground mining**
A. V. Sakhnov, O. Z. Gabaraev
- 96 **Distribution and accumulation of heavy metals in the catchment catenary complex and bottom sediments of the water body in an urban environment**
A. A. Seleznev, T. G. Okuneva, I. V. Yarmoshenko, G. P. Malinovskiy, D. V. Kiseleva

Выявление карста геофизическими методами с применением микросейсмических зондирований 108 **Karst detection by geophysical methods using microseismic sounding**
В. А. Давыдов V. A. Davydov

Комплексный подход к решению горно-экологических задач на основе анализа внутренних и внешних факторов и оценки рисков 114 **Integrated approach to solving the mining-environmental issues based on the analysis of internal and external factors**
А. В. Хохряков, А. Г. Студенок, С. Г. Фролов A. V. Khokhryakov, G. A. Studenok, S. G. Frolov

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Методический инструментарий оценки конкурентоспособности предприятий горнопромышленного комплекса 122
А. С. Соколов, А. В. Душин, В. В. Балашенко, О. В. Гензель
(In English)

Влияние горнодобывающих предприятий на налоговые доходы бюджета Республики Коми 131
И. Г. Бурцева, Е. Н. Тимушев

Технико-экономическое сравнение вариантов разработки сложноструктурных пластов Эльгинского месторождения 139
Д. В. Хосоев

ИСТОРИЯ ГОРНОГО ДЕЛА

Александр Васильевич Калугин (1857–1933) и бывший калугинит (ныне джансит-(CaMnMg)) 148
А. Г. Шорин, Ю. В. Ерохин, С. В. Кропанцев

Научные достижения сотрудников УГУ в области поисков и разведки месторождений пьезооптического и жильного кварца 157
Ю. А. Поленов

ECONOMIC SCIENCES

Methodological tools for assessing the competitiveness of enterprises of the mining complex 122
A. S. Sokolov, A. V. Dushin, V. V. Balashenko, O. V. Genzel'
(In English)

Impact of mining enterprises on tax revenues of the budget of the Republic of Komi 131
I. G. Burtseva, E. N. Timushev

Technical and economic comparison of options for the development of complex structural formations of the Elga field 139
D. V. Khosoev

HISTORY OF MINING

Aleksandr Vasil'evich Kalugin (1857–1933) and former kaluginite (now jahnsite-(CaMnMg)) 148
A. G. Shorin, Yu. V. Erokhin, S. V. Kropantsev

Scientific achievements of USMU employees in the field of searches and exploration of deposits of piezo-optical and vein quartz 157
Yu. A. Polenov

Науки о Земле Earth sciences

УДК 550.461

<http://doi.org/10.21440/2307-2091-2023-1-7-12>

Climate change and scarcity of water resources in Algeria

Imed Eddine ZERDOUMI*
Vladimir Yur'evich ABRAMOV**

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow, Russia

Abstract

The importance of work is due to the importance of water in the continuation of human life and its great role in practicing its various activities, which concern industry, agriculture and various fields.

The research methods included the increasing scarcity of water resources resulting from the decrease in the quantities available to the individual, the deterioration of the quantity and the objectives of economic and social development, thus imposing the development and definition of a water management strategy in the medium and long term. In recent years, the water scarcity crisis has increased and exacerbated due to the drought wave that the region suffers from, and it has greatly affected the region.

As a result of the research, by the year 2025, a deficit of one billion cubic meters of water will be recorded. It is also possible to avoid this deficit in the hydrographic region of Constantine – Seybousse – and this is due to the dams that are in the process of being completed.

In order to eliminate the shortage of water in the region, the amount of storage in dams must be increased and water desalination plants should be established in several areas in order to re-use wastewater. We can also avoid the shortage in the amount of water by building small dams and hill reservoirs, and this is to avoid siltation in large dams. Among the solutions are also increasing surface and groundwater resources, searching for new resources, dealing with losses, and improving the quality of available water.

Keywords: Water, Dams, Water resource, climate, groundwater, evapotranspiration, desalination.

Introduction

Algeria is a southern Mediterranean country with a semi-arid climate (300–400 mm total annual rainfall) (Onm, 2010). It is one of the poorest countries in terms of hydroelectricity, with a large gap between east and west. This general weakness of precipitation is linked to internal spatial imbalances. The western regions of Algeria suffer from drought, while the eastern part of the country is characterized by a humid climate due to its mountainous terrain. There are wadis whose contribution exceeds 1,000.106 m³/year (Remini, 2010).

Water resource problems at the national level therefore remain a major concern due to these unfavorable climatic conditions, rapid population growth and the quantitative and qualitative degradation of surface and groundwater.

Algeria is among the poorest countries in terms of water potential, i.e. below the theoretical scarcity threshold set by the World Bank at 1,000 m³ per inhabitant per year (CNES, 2000) [1].

The water situation in Algeria is a burning topical issue, particularly in terms of drinking water supply. This question is fundamental in more ways than one. It is first of all because of its decisive impact on the living conditions of citizens. It is also important because of its certain influence on the proper functioning of the national economy and on the balance of our envi-

ronmental system. Finally, it is so in that it constitutes today and throughout the world, a leading geostrategic issue (ADE 2002).

Due to its geographical location in the arid and semi-arid zone, Algeria is subject to unfavorable physical and hydro-climatic conditions. Indeed, since 1975, a gradual decrease in rainfall has occurred in the Quest region before spreading to the whole country. The rainfall deficit compared to the average is around 30% [2].

The observed climate changes and the drought that has been going on for several decades in North Africa have particularly affected Algeria and have had a negative impact on the country's water resources.

Climate, morphology and rainfall in Algeria. From North to South of the Algerian territory, there are three sets which differ in their relief and morphology: the Tell chain and the coast, the Atlas chain which runs along the High Plains further to the South, and the Saharan desert which extends beyond the Atlas Mountains. This arrangement of the relief, marked by different climatic conditions, determines the agriculture of the regions and the volume of water resources.

Most of the Algerian territory is a desert (87%) where rainfall is almost zero, but which contains significant fossil

✉1042215054@rudn.university

**abramov-vyu@rudn.ru

Table 1. The type of climate in each region and the percentage it represents of the national area

Таблица 1. Тип климата в каждом регионе и его процентная доля от территории страны

Region	Share of national area, %	Type of climate
Tellian region (North)	4	Mediterranean on the coast
Highland steppe region (between the Tellian Atlas and the Saharan Atlas)	9	Semi-arid
Region saharienne (Sud)	87	Arid

groundwater resources. The northern part, characterized by its Mediterranean climate, has renewable water resources, both for surface water and groundwater.

90% of surface waters are located in the Tell region, which covers about 4% of the territory.

The country is characterized by a strong disparity between East and West.

The western region is well endowed with plains but benefits from low rainfall. The eastern region is a mountainous area where the main rivers of the country flow.

The climate of Algeria is known for its geographical diversity and its great interannual rainfall variability. Two elements are to be distinguished: variability in terms of rainfall between the West (350 mm of rain on average), the East (1,000 mm) and the high reliefs (where some years can reach 2,000 mm), which becomes almost non-existent from the Sahara (average less than 100 mm) and a concentration of precipitation over time (from December to April each year, when the climatic demand, evapotranspiration, is the lowest) [3].

The main hydraulic problems in Algeria. The growing scarcity of water resources resulting from the reduction in the quantities available per inhabitant, the degradation of the quantity and the objectives of economic and social development therefore impose the development and definition of a water management strategy in medium and long term. The water problem is aggravated in recent years of drought that have affected the entire territory, have shown how necessary it is to pay the greatest attention to water. This vital resource is threatened in its quality and in its quantity. Despite the construction of new dams and the use of desalination, Algeria will record a water deficit of 1 billion m³ by the year 2025.

Siltation of water dams in Algeria. The number of dams used in Algeria is 65 out of the 80 completed dams with a capacity of 8 billion m³.

Receive more than 40 million m³ of solid material annually. The distribution of the dams on the five hydrographic basins clearly indicates that the dams of the region of Chélif-Zahrez are the dams most threatened by the phenomenon of siltation, since the annual sedimentation rate is 0.75%. This is due to the strong erosion of the watersheds of the region, favored by the nature of the soils and the absence of afforestation. Even for small dams, the filling rate assessed in 2002 in the Chélif-Zahrez watershed is 16% of the total capacity, it is much higher compared to that of other regions.

Water availability in Northern Algeria. Surface water is stored in dams. In 2022, Algeria has 65 large dams with a capacity of 8 billion m³.

The water problem has been aggravated in recent years by a drought that has affected the entire territory of our country, and which has shown how necessary it is to pay the greatest attention to water. The division of Northern Algeria into four regions is based on the following criteria:

- the geographical and natural characteristics of the regions;
- the grouping of watersheds and sub-watersheds, between which transfer needs exist.

We note that the global confrontation by 2020 has made it possible to quantify a deficit of approximately 0.9 billion m³ in northern Algeria. The only region that seems to escape the deficit at this horizon, is the hydrographic region of Constantinois–Seybouse–Mellègue, knowing that it was in deficit at the horizon of 2000 and was able to absorb this deficit thanks to the high regularizable volume ensured by the dams in construction. For example, the Beni Haroun dam, which regulates a volume of 432 million m³.

We note that currently, the regions of Algiers Soummam–Hodna and Oranie Chott Chergui are in deficit, which has led to a reduction in water intended for irrigation in order to favor the supply of drinking water (AEP) in these regions. This accentuated deficit in the regions of Chélif-Zahrez and Algiers Hodna–Soummam by 2020. The confrontation between resources and needs is a revealing and very significant indicator that guides us as to the future of the water policy that we are conducting in order to mitigate the effect of the deficit. It is clear that northern Algeria registers on the one hand, an enormous lack of resources at the very moment when the needs increase and on the other hand, the volume of water that can be mobilized is decreasing. This is due to the various natural or human problems that affect the sites likely to capture water [4].

Conventional waters

Surface waters. The volume of water on Earth in solid form, liquid and gas is estimated at 1,384,120,000 km³ of which only 0.26% is directly usable fresh water. It is estimated that there is theoretically enough fresh water to feed some 20 billion people. Unfortunately it is not evenly distributed, as evidenced by the vast arid and semi-arid regions.

Algeria is a semi-arid country, even Arid (200 to 400 mm) and the water resources are weak, irregular, and located in the coastal strip, the total contribution of precipitation would be of the order of 100 billion m of water per year of which 12.4 billion m³ in superficial flows, and only 6 billion m³ can be mobilized taking into account technically favorable sites (Hydrology, topography, geology) [6].

Properties of sea water. The presence of salts in water strongly modifies certain properties (density, compressibility, freezing point, activity coefficient) while others are less influenced (viscosity, light absorption). Other properties essentially depend on the amount of salt in the water (conductivity, osmotic pressure).

The temperature of sea water can vary from –1.9 °C under the influence of polar currents (freezing point of sea water at a concentration of 35 g/l of salts) up to 35 °C at the level of the Arabian Peninsula.

The different properties of seawater depend on its temperature, salinity and pressure (related to depth). They can be highly variable from place to place due to large variations in salinity, temperature and depth [7].

Desalination of sea water. Water desalination is a process that makes it possible to obtain fresh water from brackish

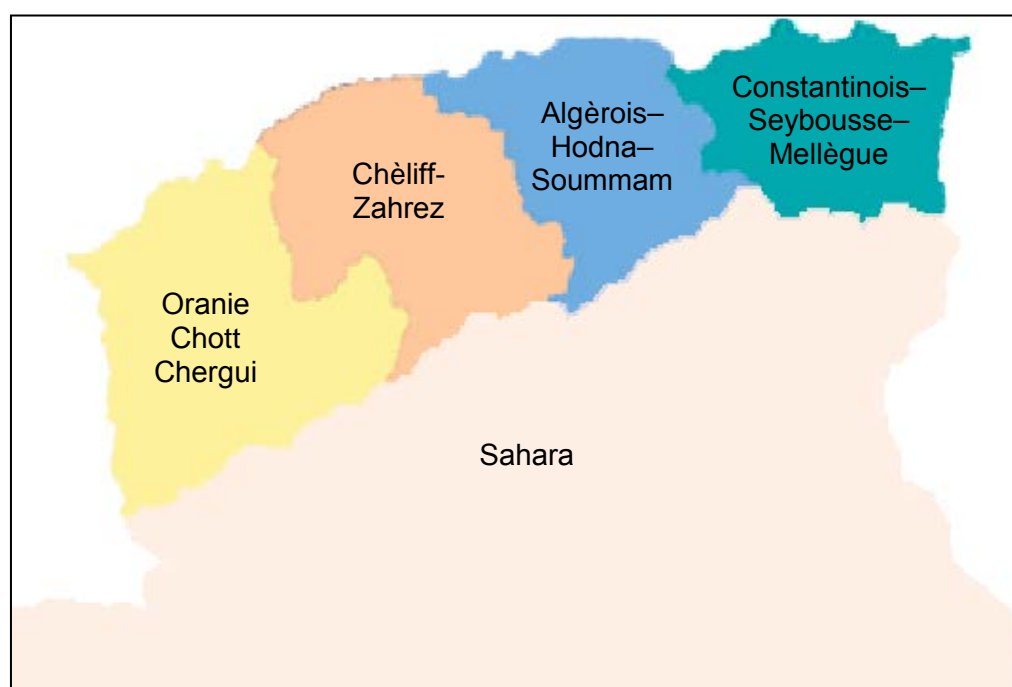


Figure 1. Division of northern Algeria into regions [5]
Рисунок 1. Деление северного Алжира на регионы [5]

or salt water. Brackish water is undrinkable salt water with a lower salinity than seawater. Brackish water contains between 1 and 10 g of salts per litre.

It is sometimes surface water but most often groundwater which has become loaded with salts while crossing the soil. Their compositions therefore depend on the nature of the soils crossed [8].

The study and construction of a reverse osmosis desalination unit with a capacity of 200 m³/d.

The study and construction of a seawater desalination unit using the multi-flash technique, with a daily capacity of 480 m³.

Following the drought of recent years which caused a lack of drinking water in the majority of municipalities, an emergency program was developed by the government to compensate for the lack of water resources. The aim is to build 21 desalination stations with a production of 57,500 m³/d.

The desalination of sea water remains a safe solution, given the drought that has plagued our country in recent years. However, it would be preferable for the desalination units intended to supply drinking water to the population to operate only during periods of crisis and long drought.

Strategies to increase water storage. To avoid catastrophic water scarcity by 2025, we must maximize surface and groundwater resources, search for new resources, address losses, and improve the quality of available water. Water quality is a major issue because it has been threatened by human activities for 30 years. Innovative water resources planning is needed to improve local needs in three main categories (industrial, agricultural and private). In Algeria, it is clear that on the one hand there is a significant shortage of resources, but on the other hand the need is increasing and the quantity of water that can be mobilized is decreasing for various reasons. A natural or human problem that affects a place that can absorb water. Based on this obser-

vation, we propose a set of proposals aimed at protecting the resources currently mobilized, but trying to increase them as much as possible. This leads to reduced deficits and increased satisfaction. Improve current and future conditions to achieve a state of equilibrium. Our suggestions are:

Use of artificial groundwater recharge. Some hydraulic problems can be solved by artificial recharge of the aquifer. Dangerous drawdowns due to overexploitation of water in the Mitidja aquifer have even caused road subsidence in the region. Vigorous pumping of the aquifer caused seawater intrusion into the coastal aquifer of the Oued Nador plain. The salt wedges continue to spill over the water table. It is time to popularize this mode of water storage in Algeria, especially since it does not require sufficient material resources. However, first of all, it is necessary to carry out a survey of underground aquifers that can store water and determine where such hydraulic works will be carried out. When building a dam, it would be desirable to combine it with an artificial rise in the water table. The artificial recharge of aquifers could be an alternative solution to the billions of cubic meters of water that still flow into the ocean and cannot be mobilized by the construction of dams. It can also mitigate the subsidence of groundwater tables caused by insufficient mobilization of surface resources.

Dam dredging. Dredging is as expensive as building a new dam, but dredging technology is essential when dam stability is threatened or when land for new construction is scarce. After having accelerated the silting up of the Fergoug III dam (today), Algeria acquired in 1989 a new rotor suction dredger called "REZOUG Youcef". The 300 ton gross weight dredge is designed to pump 2.5 tons to a height of 28 meters., a 700 mm pipe with a maximum mixed flow of 1600 l/s and a dredging depth of 3 to 16 m, the results obtained during this dredging are presented below.

**Results of the work of the dredge “REZOUG Youcef”
Результаты работы земснаряда «REZOUG Youcef»**

Initial capacity of the dam	18 · 10 ⁶ m ³
Capacity before desilting	3,9 · 10 ⁶ m ³
Vase volume	14,1 · 10 ⁶ m ³
Devasted volume (density 1.6).....	6,5 · 10 ⁶ m ³
Maximum silting depth	16 · 10 ⁹ m ³
Amount of water used	7 · 10 ⁶ m ³

Construction of small dams and hill reservoirs. Because there is no suitable place to build a large dam, it is encouraged to build reservoirs in the mountains. These are small, shallow dams built with earth embankments that allow local management of this method of storage. Algeria currently has more than 61 small dams distributed in 04 river basins in northern Algeria, as shown in table 2.

Algeria took part in the early 1980 in an ambitious program to build a large number of mountain reservoirs. Unfortunately, this experiment was a semi-failure. Some reservoirs were silted up during the first years of operation, while others were washed away by the first floods. Algeria now plans to build more than 500 mountain reservoirs over the next five years to protect water and soil and minimize sediment intrusion into large dams. These small economic structures can mobilize millions of m³ of surface water for irrigation. However, carrying out such work requires very extensive and serious technical research to avoid two main problems: rapid siltation of reservoirs by one or two floods; failure of the levee during flooding due to ignoring the levee saturation line.

Wastewater recycling and reuse. Currently, the treated wastewater from the existing treatment plant is discharged into the wadi, but in areas where the water demand is not met. Therefore, it does not make sense to continue discharging treated water into the wadi. Currently, the sewage plant park consists of 77 stations (35 municipal areas, 34 industrial areas and 8 tourist areas). Installed capacity was estimated at nearly 140 million m³/year at the end of 1987. Most wastewater treatment plants are now closed for various reasons, including maintenance. Given Algeria’s critical situation in terms of water resources, we need to find quick solutions for these stations. Because not so long ago, the unconventional water resources of Algeria. Falling into alternative solutions to increasingly scarce traditional resources. In terms of emissions in the urban environment, the volume of wastewater discharged by the sewerage

network, which represents approximately 75% of flows consumed, was 350 million m³ in 1979 and 660 million m³ in 1985. Estimate. 1.3 billion m³ in 2020. The four regions in 2020 are distributed as follows.

Conclusions

In Algeria, a deficit of 1 billion m³ will be recorded in 2025 (in the case of poor water management and lack of control of unconventional resources). The only region that seems to escape the deficit at this horizon is the hydrographic region of Constantinois–Seybousse–Mellègue thanks to the high volume that can be regulated by the dams under construction, in particular that of Beni Haroun, which allows an annual volume of 430 million m³ to be regulated.

Water storage has always been at the forefront of the concerns of states in the Maghreb region. Today, the storage of 44 surface and underground waters represents 30 billion m³ (without taking into account the fossil waters of the deep aquifers) distributed as follows: 19 billion m³ in Morocco, 9 billion m³ in Algeria and approximately 3 billion m³ in Tunisia.

To overcome the predicted water shortage in the region by 2025, we need to increase storage capacity, minimize losses and explore other more profitable reservoirs. The lack of favorable sites and the excessive cost of the project make the construction of a large dam less likely. The Maghreb is a semi-arid and arid region with excessive evaporation rates in some places 2 meters/year. For example, Morocco has an evaporation loss of 1 billion m³/year out of 14 billion m³.

Algeria loses about 200 million m³/year out of the 5 billion m³ stored in dams. Water erosion is severe in the Maghreb region. It is estimated that dams in the three countries record more than 130 million m³ of silt each year. Another growing problem in the region is the eutrophication of lakes and dams. For these reasons, it is time to avoid large structures in favor of small and medium reservoirs and aquifers. 500 mountain reservoir construction projects implemented in Algeria Introduced from 2000. Artificial recharge of aquifers is the best way to store water, avoid major losses through evaporation and siltation, and improve quality some water. Unfortunately, the technology is still in its infancy in the Maghreb region, especially in Algeria. It’s time to explore new underground reservoirs (aquifers) and expand the experience to the whole region. It is also desirable to combine both options. Construction of small and medium capacity dams and aquifers. Experiments carried

**Table 2. Distribution of small dams in northern Algeria
Таблица 2. Распространение малых дамб в северном Алжире**

Capacity	Number	Hydrographic basin
30	16	Oranie Chott Chergui
3	6	Chélif-Zahrez
34	28	Algérois–Hodna–Soummam
14	11	Constantinois–Seybousse–Mellègue

**Table 3. Recycling of wastewater from the 4 regions of northern Algeria
Таблица 3. Повторное использование сточных вод из 4 районов северного Алжира**

Total Algérie du Nord	Constantinois Seybousse– Mellègue	Algérois–Hodna–Soummam	Chélif-Zahrez	Oranie Chott Chergui	Regions Designations
550	140	230	90	90	Wastewater treated in m ³ / year, Horizon 2020

out by the Hydraulic Service of the Boukourdane Dam (Algeria) have made it possible to increase the volume of the alluvial water table in the Oued El Hachem plain. The water table also rises at key points, so the bottom outlet discharge process has a positive effect. How to define the optimal water storage strate-

gy Finding better storage sites is essential, and such strategies require a combination of different sizes of surface storage systems and groundwater recharge. Combining the two options requires knowledge of the local hydrology and hydrogeology and the presence of suitable aquifers for water storage.

REFERENCES

1. Bennabi F., Hamel L., Bouiadjra S. E. B., Ghomari S. 2012, Ressources hydriques sous tension et enjeux de développement durable dans la wilaya de Sidi Bel Abbès (Algérie occidentale). *Méditerranée*, pp. 105–111. <https://doi.org/10.4000/mediterranee.6330>
2. Akli S. 2002, Seawater desalination or water-saving irrigation: memory for obtaining magister diploma. Algiers: University of science and technology Houari Boumediene, pp. 64–72.
3. Boularak M. 2004, Memory for obtaining magister diploma. Constantine, Algiers: University of Brothers Mentouri Constantine, pp. 81–82.
4. Remini B. 2010, The problem of water in Northern Algeria. *Larhyss Journal*, no. 8, pp. 27–46.
5. Sahara Hydrographic Basin Agency. URL: https://www.google.com/search?q=oranie+chott+chergui&tbm=isch&hl=fr&chips=q:oranie+chott+chergui,online_chips:carte+g%C3%A9ographique&sa=X&ved=2ahUKEwjm8pvuzqn9AhXvnCcCHYDmDrgQ4IYoB3oECAEQMw&biw=1349&bih=600#imgrc=oVf6-0Xj2ejGpM
6. Kettab A. 2001, Water resources in Algeria: strategies, challenges and vision. *Desalination*, vol. 136, Issues 1–3, pp. 25–33. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(01\)00161-8](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(01)00161-8)
7. Zizi N. 2013, Memory for obtaining magister diploma. Algiers: University of science and technology Houari Boumediene, 69 p.
8. 2010, ONEP. Environmental impact of discharges from desalination plants: Memory of Magister. Rabat: University of Mohammed V, 93 p.

The article was received on December 18, 2022

Изменение климата и нехватка водных ресурсов в Алжире

Имед Еддин ЗЕРДУМИ*

Владимир Юрьевич АБРАМОВ**

Российский университет дружбы народов (РУДН), Москва, Россия

Аннотация

Актуальность данной работы обусловлена важностью воды в продолжении жизни человека и ее большой ролью в осуществлении различных видов деятельности, которые касаются промышленности, сельского хозяйства и различных областей.

Методы исследования. Растущий дефицит водных ресурсов в результате уменьшения количества воды, доступной для человека, сокращение количества целей экономического и социального развития, навязывают разработку и определение стратегии управления водными ресурсами в среде в долгосрочной перспективе. В последние годы кризис нехватки воды увеличился и усугубился из-за волны засухи, от которой страдает регион, и это очень сильно на него повлияло.

В результате исследований можно заключить, что к 2025 году будет зафиксирован дефицит в один миллиард кубометров воды. Возможно избежать этого дефицита в гидрографическом районе Константина – Сейбусе – и это благодаря плотинам, которые находятся в процессе завершения строительства. Для устранения дефицита воды в регионе необходимо увеличить объем хранилищ в плотинах и установить в нескольких районах опреснительные установки для повторного использования сточных вод. Мы также можем избежать нехватки воды, построив небольшие плотины и горные водохранилища, чтобы избежать заиливания больших плотин. Решение данной задачи включает увеличение ресурсов поверхностных и подземных вод, поиск новых ресурсов, борьбу с потерями и улучшение качества имеющейся воды.

Ключевые слова: вода, плотины, водный ресурс, климат, подземные воды, эвапотранспирация, опреснение.

ЛИТЕРАТУРА

1. Беннаби Ф., Хамель Л., Буйаджра С. Э. Б., Гхомари С. Водные ресурсы под давлением и проблемы устойчивого развития в вилайете Сиди-Бель-Аббес (Западный Алжир) // Средиземное море, 2012. С. 105–111. <https://doi.org/10.4000/mediterranee.6330>
2. Акли С. Опреснение морской воды или водосберегающее орошение. Алжир, 2002. С. 64–72.
3. Буларак М. Заметки для получения диплома магистра. Алжир, 2004. С. 81–82.
4. Ремини Б. Проблема воды в Северном Алжире // Larhyss Journal. 2010. № 8. С. 27–46.
5. Агентство гидрографического бассейна Сахары. URL: https://www.google.com/search?q=oranie+chott+chergui&tbm=isch&hl=fr&chips=q:oranie+chott+chergui,online_chips:carte+g%C3%A9ographique&sa=X&ved=2ahUKewjm8pvuzqn9AhXvnCcCHYDmDrgQ4lYoB3oECAEQMw&biw=1349&bih=600#imgrc=oVf6-0Xj2ejGpM
6. Кеттаб А. Водные ресурсы в Алжире: стратегии, проблемы и видение // Desalination. 2001. Т. 136. Вып. 1–3. С. 25–33. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(01\)00161-8](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(01)00161-8)
7. Зизи Н. Заметки для получения диплома магистра. Алжир, 2013. 69 с.
8. Национальное управление питьевой воды. Воздействие на окружающую среду сбросов опреснительных установок. Рабат, 2010. 93 с.

Статья поступила в редакцию 18 декабря 2022 года

✉ 1042215054@rudn.university

**abramov-vyu@rudn.ru

Phosphate mineralization in leucogranites of the Peshcherninsky stock (Reftinsky massif, Middle Urals)

Dmitriy Dmitrievich Korovin*

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

Abstract

Relevance. Phosphate mineralization of Devonian intrusions in the Eastern zone of the Middle Urals is currently poorly understood, the data obtained may be important for interpreting the origin of rocks, especially in the case when standard methods of geochemical analysis of rocks do not give a clear picture. Xenotime and monazite are minerals concentrating rare earth elements, and REE distribution graphs are a very important characteristic of rocks.

Objective – study of the chemical composition of phosphates in leucogranites of the Peshcherninsky stock.

Research methodology. Determination of the chemical composition of the samples was carried out on a Cameca SX100 electron probe microanalyzer at the Common Use Center Geoanalyst, analyst V. A. Bulatov. The analysis was carried out at an accelerating voltage of 15 kV using crystal analyzers TAP, LPC0, LPET, PET, LLIF, LIF. The electron probe current was 10 nA (apatite) and 60 nA (REE, Th phosphates). The pulse accumulation time at the peak maximum was 10 s (for most elements) and 20 s (for REE, Th, U, Pb). During the analysis, on a Cameca SX100 electron probe microanalyzer, the following were used as standards: apatite (for analysis of the content of P, Ca), chlorapatite (Cl), fluorine-phlogopite (F), diopside (Mg, Si), albite (Na, Al), orthoclase (K), rhodonite (Mn), SrSO₄ (Sr), TiO₂ (Ti), Fe₂O₃ (Fe), SrSO₄ (Sr), BaSO₄ (S), Cr₂O₃ (Cr), pyromorphite (Pb) and aluminosilicate glasses doped with REE (La, Ce, Y, Sm, Pr, Nd, Th, U, Tm, Eu, Tb, Dy, Gd, Er, Yb, Lu, Ho). Due to the use of a low probe current in the analysis of apatites, the detection limits for elements were: 300–600 ppm for S, Cl, Al, Mg, Si, Ca, Na and 2000–2500 ppm for P, F, Fe, Mn, Cr. For REE phosphates, the following detection limits were achieved using an increased probe current: 100–200 ppm for Si, Ca, Cr, K, Al, Mg, Ti, Pb, 300–500 ppm for Na, S, P, Mn, Y, Th, U, 1200–1500 ppm for Sr, Nd, Ce, 1700–2000 ppm for La, Tm, Tb, 2500–2800 ppm for Yb, Dy, Lu, Pr, 3500–4700 ppm for Eu, Sm, Gd, Ho.

Results. For the first time in Russia, cheralite was found and described in a plutonic rock. The article presents the first data on the chemical composition of phosphates (apatite, monazite, xenotime, cheralite) from the leucogranites of the Peshcherninsky stock, which formed at the final stage of the formation of the polychronous and polyformational Reftinsky gabbro-granitoid massif.

Conclusion. Apatite belongs to the fluorine variety with an admixture of manganese, monazite is represented by the cerium variety, and xenotime is represented by yttrium. Cheralite has a transitional trace element composition, and depending on the zone, it can be attributed to both cerium and yttrium varieties. The admixture of manganese in apatite may indicate partial mixing of the melt with sedimentary or metasedimentary rocks.

Keywords: fluorapatite, monazite-(Ce), xenotime-(Y), cheralite, leucogranite, Reftinsky massif, Middle Urals.

Introduction

Phosphates are quite common in rocks, a striking example of this is apatite, the chemical composition of which can vary greatly depending on the conditions of formation of the rock. In particular, xenotime and monazite are minerals concentrating rare earth elements. In the chemical analysis of rocks, distribution diagrams of rare earth elements are often used to characterize rocks [1]. Therefore, the study of accessory mineralization can provide additional useful information about the genesis of rocks (in combination with other features).

The article presents the first data on the chemical composition of phosphates (apatite, monazite, xenotime, cheralite) from the leucogranites of the Peshcherninsky stock, which formed at the final stage of the formation of the polychronous and polyformational Reftinsky gabbro-granitoid massif.

Cheralite is a rare mineral from the monazite group. Cheralite was first described in a pegmatite dyke at Kuttankuli, Kerala, India [2]. In Russia, cheralite was identified as a bismuth-bearing brabantite in the rare-metal pegmatites of the Lipovsky mines in the Middle Urals [3]. In 2006, brabantite as a mineral was abolished; since then, it has been synonymous with cheralite [4]. Two more finds of cheralite were made in the Urals. It was discovered in the beresites of the Berezovsky gold deposit [5], and also described in the ores of the Mikheevsky porphyry copper deposit, Southern Urals [6].

The author discovered cheralite in the leucogranite of the Peshcherninsky stock; up to this point, no information about the finds of cheralite in plutonic rocks has been published in Russia yet. There is an assumption that, despite its rarity, the mineral is quite common, especially for rocks of granite com-

*korovin@igg.uran.ru

position. But the poor knowledge of accessory mineralization and the tiny size of crystals currently make cheralite a rather exotic mineral.

In world practice, this mineral has already been found in plutonic rocks. An example of one of these finds is the article on the Australian granites of God's Lake, in one of the largest plutons, in the western part of the Lakhan fold belt [7]. These granites are of Devonian age and belong to

S-type granites. This article compares the chemical composition of cheralite from God's Lake with cheralite from the Peshcherninsky stock.

Brief geological description. The Reftinsky gabbro-granitoid massif is one of the largest areas of magmatism on the eastern slope of the Middle Urals. It is located within the eastern margin of the Middle Ural segment of the Ural mobile belt. The Reftinsky massif is polychronous and polyformational; it

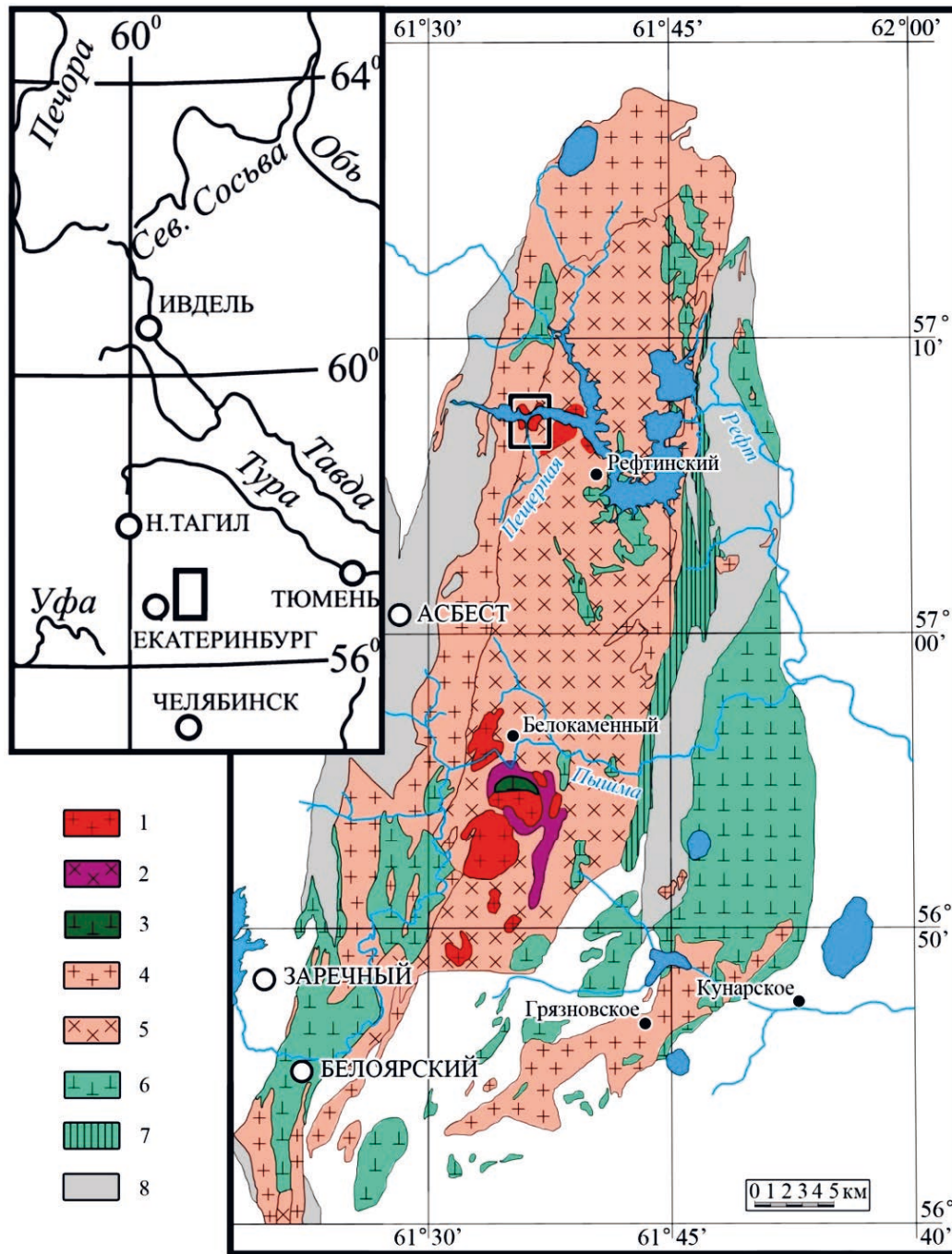


Figure 1. Geological scheme of the Reftinsky massif (compiled on the basis of the State geological map at a scale of 1 : 200,000 [15] with minor corrections by the author). The position of the Peshcherninsky stock is indicated by a rectangle; 1–3 – Devonian intrusions: 1 – granitoids (γD_2), 2 – diorites (δD_1), 3 – gabbro (γD_1); 4–7 – Reftinsky complex: 4 – plagiogranites ($\rho \gamma S_2$), 5 – quartz diorites and tonalites ($\rho \delta S_1$), 6 – gabbro (γS_1); 7 – complex of parallel dolerite dikes (V); 8 – rocks of ophiolite association, Alapaevsky dunite-harzburgite-gabbro complex
Рисунок 1. Геологическая схема Рефтинского массива (составлена на основе Государственной геологической карты масштаба 1 : 200 000 [15] с незначительными уточнениями автора). Положение Пещернинского штока обозначено прямоугольником; 1–3 – девонские интрузии: 1 – гранитоиды (γD_2), 2 – диориты (δD_1), 3 – габбро (γD_1); 4–7 – Рефтинский комплекс: 4 – плагиограниты ($\rho \gamma S_2$), 5 – кварцевые диориты и тоналиты ($\rho \delta S_1$), 6 – габбро (γS_1); 7 – комплекс параллельных долеритовых даек (V); 8 – породы офиолитовой ассоциации, Алапаевский дунит-гарцбургит-габбровый комплекс

Table 1. Chemical composition of apatite from leucogranites of the Pescherninsky stock, wt. %
Таблица 1. Химический состав апатита из лейкогранитов Пещернинского штока, мас. %

Oxides	Analysis number									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SO ₃	0,10	0,11	0,21	0,19	0,09	–	0,17	0,10	0,09	0,11
P ₂ O ₅	40,88	40,60	41,54	41,43	41,32	41,31	41,62	42,59	42,17	42,57
SiO ₂	0,26	0,23	0,22	0,15	0,12	0,15	0,12	0,14	0,13	0,09
FeO	0,99	0,77	1,28	1,25	–	0,17	0,58	0,20	0,23	0,28
MnO	0,97	1,05	0,93	0,92	1,27	1,16	1,34	1,09	1,31	1,48
CaO	54,87	54,33	54,24	54,31	54,96	54,78	53,27	53,60	53,72	53,14
Na ₂ O	0,27	0,37	0,29	0,27	0,17	0,16	0,28	0,27	0,22	0,22
K ₂ O	–	–	–	–	0,27	0,33	–	–	–	–
F	3,11	2,94	3,07	3,00	3,19	3,51	3,15	3,13	3,16	3,18
Cl	0,12	0,13	0,12	0,12	0,12	0,13	0,23	0,21	0,17	0,19
Total	101,57	100,53	101,90	101,64	101,50	101,70	100,76	101,33	101,20	101,26
<i>Crystal chemical formulas</i>										
1	(Ca _{4,93} Mn _{0,07} Fe _{0,07} Na _{0,04}) _{5,11} [(P _{2,96} Si _{0,02} S _{0,01}) _{2,99} O _{12,00}](F _{0,84} Cl _{0,02}) _{0,86}									
2	(Ca _{4,99} Mn _{0,08} Fe _{0,06} Na _{0,06}) _{5,19} [(P _{2,95} Si _{0,02} S _{0,01}) _{2,98} O _{12,00}](F _{0,80} Cl _{0,02}) _{0,82}									
3	(Ca _{4,90} Fe _{0,09} Mn _{0,07} Na _{0,05}) _{5,11} [(P _{2,97} Si _{0,02} S _{0,01}) _{3,00} O _{12,00}](F _{0,82} Cl _{0,02}) _{0,84}									
4	(Ca _{4,92} Fe _{0,09} Mn _{0,07} Na _{0,04}) _{5,12} [(P _{2,97} Si _{0,01} S _{0,01}) _{2,99} O _{12,00}](F _{0,80} Cl _{0,02}) _{0,82}									
5	(Ca _{4,98} Mn _{0,03} K _{0,03} Na _{0,03}) _{5,13} [(P _{2,96} Si _{0,01} S _{0,01}) _{2,98} O _{12,00}](F _{0,85} Cl _{0,02}) _{0,87}									
6	(Ca _{4,96} Mn _{0,08} K _{0,04} Na _{0,03} Fe _{0,01}) _{5,12} [(P _{2,96} Si _{0,01} S _{0,01}) _{2,97} O _{12,00}](F _{0,94} Cl _{0,02}) _{0,96}									
7	(Ca _{4,85} Mn _{0,10} Na _{0,05} Fe _{0,04}) _{5,04} [(P _{2,99} Si _{0,01} S _{0,01}) _{3,01} O _{12,00}](F _{0,85} Cl _{0,03}) _{0,88}									
8	(Ca _{4,83} Mn _{0,08} Na _{0,04} Fe _{0,01}) _{4,96} [(P _{3,03} Si _{0,01} S _{0,01}) _{3,05} O _{12,00}](F _{0,83} Cl _{0,03}) _{0,86}									
9	(Ca _{4,86} Mn _{0,09} Na _{0,04} Fe _{0,02}) _{5,00} [(P _{3,01} Si _{0,01} S _{0,01}) _{3,03} O _{12,00}](F _{0,84} Cl _{0,02}) _{0,86}									
10	(Ca _{4,79} Mn _{0,11} Na _{0,04} Fe _{0,02}) _{4,96} [(P _{3,03} Si _{0,01} S _{0,01}) _{3,05} O _{12,00}](F _{0,85} Cl _{0,03}) _{0,88}									

has a complex structure [8–12]. Its western half is composed of plagioclase granitoids (quartz diorites, tonalites, trondhjemites) [13], which are intruded by small plutons composed of potassium-sodium granitoids; some bodies also contain rocks of basic and intermediate composition, it is assumed that they are of Devonian age [14]. In the eastern part of the massif, there are two blocks composed of Early Silurian hornblende gabbro of the Reftinsky complex. These blocks are separated from plagioclase granitoids by a band of rocks of the ophiolite association (gabbroids of the layered part of the section and a complex of parallel dolerite dikes), apparently of Vendian age [15].

The author studied phosphate mineralization (apatite, monazite, xenotime, cheralite) from granitoids of the Pescherninsky stock (fig. 1), which intrude quartz diorites and tonalites of the Reftinsky complex. The Pescherninsky stock is composed of fairly homogeneous leucogranites, which contain aplite veins. For research, samples of leucogranite were taken on the right bank of the Peshchernaya River, at its mouth. The coordinates of the sampling point on the GPS receiver are 57°07.069' north latitude, 61°36.286' east longitude.

The leucogranites of the Pescherninsky stock are fine-medium-grained, quartz-feldspar rocks with biotite, have a hypidiomorphic-grained structure and a massive texture. Accessory phosphate mineralization in granitoids occurs as euhedral grains, as well as in intergrowths.

Chemical analysis of phosphates. According to its chemical composition, apatite corresponds to fluorapatite, because it contains from 2.94 to 3.51 wt. % fluorine, and chlorine varies (0.12–0.23 wt. %). The content of the main elements of the

formula varies – CaO (53.14–54.96 wt. %), P₂O₅ (40.60–42.59 wt. %). In addition to the main elements included in the crystal chemical formula of apatite, impurity elements were found that are included in the position of calcium - these are such as: MnO (0.92–1.48 wt. %), FeO (0.17–1.28 wt. %), Na₂O (0.16–0.37 wt. %), in a separate case, an impurity of K₂O appears (0.27–0.33 wt. %). In the position of phosphorus, there is an insignificant admixture of SiO₂ (0.09–0.26 wt. %) and SO₃ from 0.09 to 0.21 wt. % (table 1).

It is assumed that variations in the chemical composition of apatite depend on the stage of the onset of crystallization of the mineral and the matrix in which it was enclosed. On fig. 2, a, apatite composes euhedral grains captured by magnetite, up to 100 microns in size. In the crystal chemical formula of apatites, elevated iron contents are observed, points 1–4 (table 1). Fig. 2, b shows a transverse hexagonal section of an apatite crystal, up to 20 microns in size, which is located in potassium feldspar, points 5, 6 (a perthite plagioclase ingrowth is observed to the left of the grain). If you look at the crystal chemical formula of apatite in Fig. 2b, you can notice its distinctive feature – the presence of potassium, which is not found in other crystals in the analyzed section. Intergrowths of apatite with monazite are observed in the rock (fig. 3, a), in the figure we see two apatite grains, one of them is located on the left side of the figure in the biotite matrix in close proximity to monazite. The second grain is located on the right side of the presented image, has an intergrowth with a grain of ilmenite, monazite, and biotite, being in a plagioclase matrix (fig. 3, a). Data on the crystal chemical composition are presented in table 1.

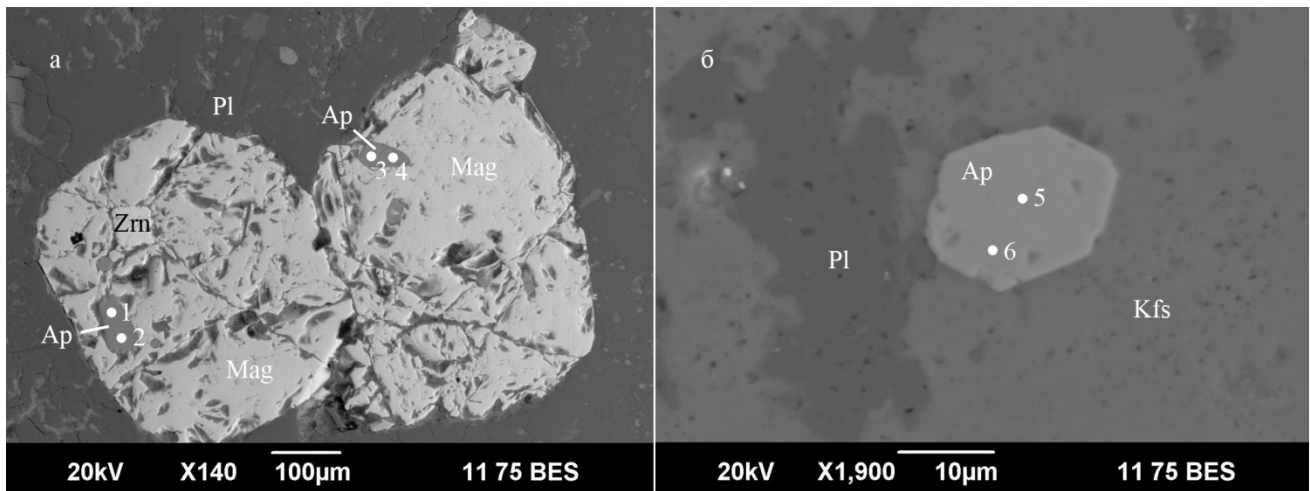


Figure 2. Apatite from leucogranites of the Pescherninsky stock: *a* – apatite and zircon inclusions in magnetite; *b* – apatite grains in potassium feldspar; the numbers indicate the points corresponding to the chemical analysis numbers in table 1; symbols (hereinafter): Ap – apatite, Mag – magnetite, Zrn – zircon, Pl – plagioclase, Kfs – potassium feldspar; photo in reflected electrons, CAMECA SX 100

Рисунок 2. Апатит из лейкогранитов Пещернинского штока: *a* – включения апатита и циркона в магнетите; *b* – зерно апатита в калиевом полевоом шпате; цифрами обозначены точки, соответствующие номерам химического анализа в табл. 1; условные обозначения (здесь и далее): Ap – апатит, Mag – магнетит, Zrn – циркон, Pl – плагиоклаз, Kfs – калиевый полевой шпат; фото в отраженных электронах, CAMECA SX 100

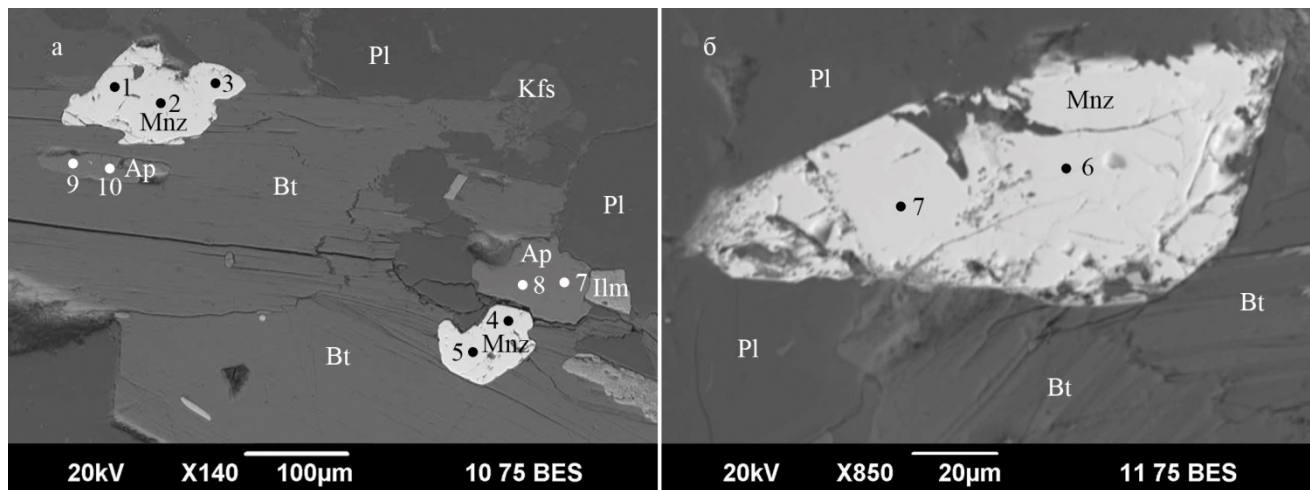


Figure 3. Monazite from leucogranites of the Peshcherninsky stock: *a* – monazite in association with apatite and ilmenite in a biotite matrix; *b* – monazite in a biotite and plagioclase matrix; the numbers indicate the points corresponding to the numbers of chemical analysis in tables 1, 2; symbols (hereinafter): Mnz – monazite, Bt – biotite, Ilm – ilmenite; photo in reflected electrons, CAMECA SX 100

Рисунок 3. Монацит из лейкогранитов Пещернинского штока: *a* – монацит в ассоциации с апатитом и ильменитом в матрице биотита; *b* – монацит в матрице биотита и плагиоклаза; цифрами обозначены точки, соответствующие номерам химического анализа в табл. 1, 2; условные обозначения (здесь и далее): Mnz – монацит, Bt – биотит, Ilm – ильменит; фото в отраженных электронах, CAMECA SX 100

Monazite, in the leucogranites of the Pescherninsky stock, forms elongated and rounded individuals up to 180 µm in size. Some crystals have intergrowths with apatite. According to the chemical composition, monazite belongs to the cerium variety, the content of the main rare earth elements varies, according to Ce₂O₃ from 25.58 to 29.05 wt. %, La₂O₃ (10.71–15.21 wt. %), Nd₂O₃ (9.83–11.84 wt. %). There is also a small proportion of impurities of the following elements: UO₂ (0.04–0.51 wt. %), ThO₂ (5.14–7.06 wt. %), Yb₂O₃ (0.04–0.25 wt. %), Tm₂O₃ (0.01–0.12 wt. %), Dy₂O₃ (0.11–0.88 wt. %), Gd₂O₃ (0.96–1.99 wt. %), Eu₂O₃ (0.04–0.26 wt. %), Sm₂O₃ (1.13–2.36 wt. %), Pr₂O₃ (2.99–3.79 wt. %), Y₂O₃ (1.14–3.47 wt. %), PbO (0.09–0.15 wt. %), SrO (0.20–0.25 wt. %), MnO (0.56–0.70 wt. %), CaO (0.63–1.11 wt. %). The content of phosphorus oxide has slight variations from 28.14 to 29.88 wt. %, as well as the admix-

ture of SiO₂ (0.53–1.17 wt. %) in position P. Monazite crystals located within one biotite lath (fig. 3, *a*), do not have any special differences in their crystal chemical composition, as well as a fine cross section of a monazite grain in fig. 4, *a* (table 2). If we compare the composition from monazite grains at points (1–5, 8) with analyzes from points (6, 7) in the crystal in fig. 3, *b*, then there are small differences, because at points (6, 7), the content of Ce and La decreases. Monazite from the biotite matrix (fig. 3, *a*) has the highest contents of Ce and La (table 2, an. 5).

Xenotime is rather rare in leucogranites of the Pescherninsky stock, mainly in intergrowths with zircon (fig. 4, *b*). According to chemical analysis, xenotime belongs to the yttrium variety, the content of Y₂O₃ is about 45.82–48.30 wt. %, and there are also impurities of such lanthanides as: Gd₂O₃ (3.84–4.95 wt. %), Dy₂O₃ (3.89–4.42 wt. %), Yb₂O₃ (4.00–4.38

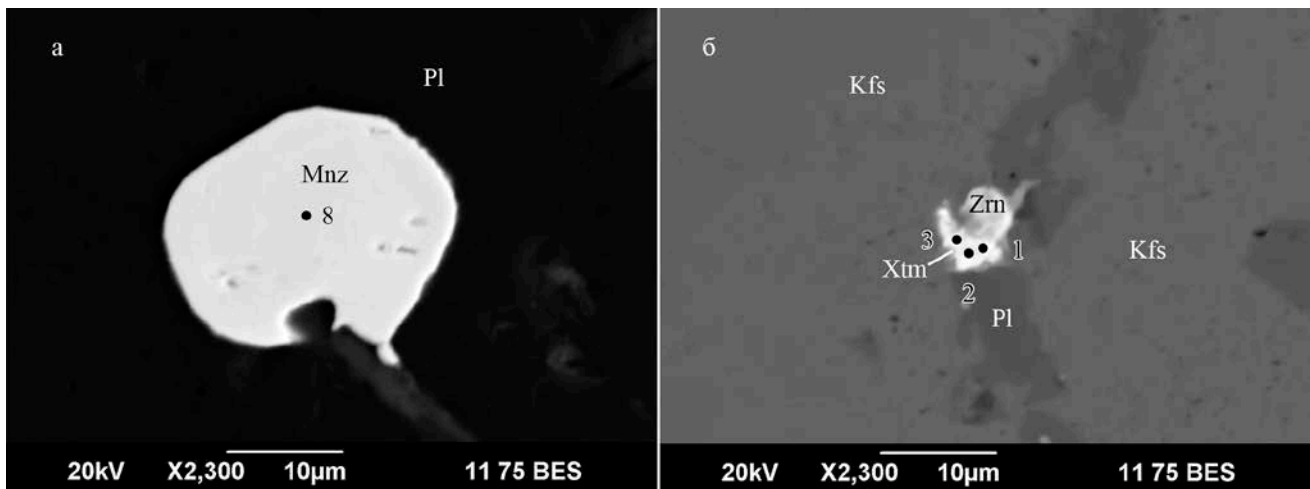


Figure 4. Monazite and xenotime from leucogranites of the Peshcherninsky stock: *a* – monazite in a plagioclase matrix; *b* – intergrowth of zircon and xenotime in a K-feldspar matrix at the boundary with a perthite plagioclase ingrowth; the number 8 indicates the point that corresponds to the analysis in table 2; the numbers 1, 2, 3 indicate the points corresponding to the chemical analysis numbers in table 3; symbols: Xtm – xenotime; photo in reflected electrons, CAMECA SX 100

Рисунок 4. Монацит и ксенотим из лейкогранитов Пещернинского штока: *a* – монацит в матрице плагиоклаза; *b* – сросток циркона и ксенотима в матрице калишпата на границе с пертитовым вростком плагиоклаза; цифрой 8 обозначена точка, которая соответствует анализу в табл. 2; цифрами 1, 2, 3 обозначены точки, соответствующие номерам химического анализа в табл. 3; условные обозначения: Xtm – ксенотим; фото в отраженных электронах, CAMECA SX 100

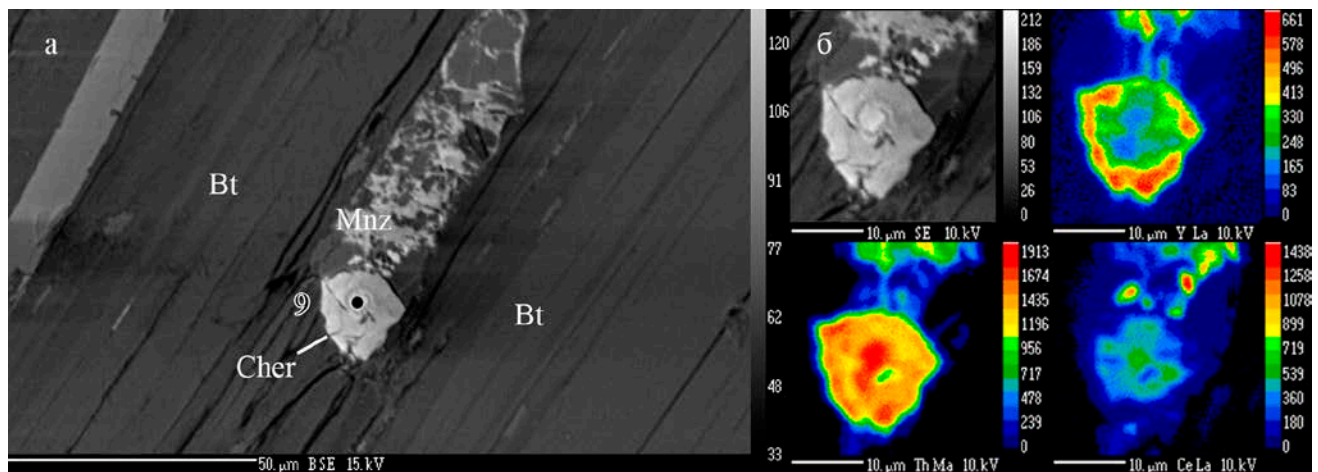


Figure 5. Cheralite with monazite in biotite from leucogranites of the Peshcherninsky stock: *a* – cheralite in a biotite matrix; *b* – distribution map of the elements Y, Th, and Ce and their content in cheralite; number 9 indicates a point that corresponds to the analysis in Table 2; symbols: Cher – cheralite; photo in reflected electrons, CAMECA SX 100

Рисунок 5. Чералит с монацитом в биотите из лейкогранитов Пещернинского штока: *a* – чералит в матрице биотита; *b* – карта распределения элементов Y, Th, Ce и их содержание в чералите; цифрой 9 обозначена точка, которая соответствует анализу в табл. 2; условные обозначения: Cher – чералит; фото в отраженных электронах, CAMECA SX 100

wt. %), Er_2O_3 (3.47–3.56 wt. %), Tm_2O_3 (0.58–0.97 wt. %), (3.89–0.01 wt. %). The content of phosphorus oxide has slight variations from 31.85 to 33.22 wt. %, as well as the SiO_2 impurity (0.52–0.82 wt. %) in position P. UO_2 (0.16–0.61 wt. %) ThO_2 (0.09–0.35 wt. %), CaO (0.13–0.22 wt. %).

A tiny cross section of cheralite grains up to 15 microns in size associated with monazite was found in the biotite grain matrix (fig. 5, *a*). This mineral is a rare calcium-thorium phosphate from the monazite group. According to the chemical composition, it mainly belongs to the cerium variety, the analysis data are given in table 2, under number 9. Cheralite from the leucogranites of the Peshcherninsky stock in comparison with cheralite from the granites of God's Lake (Australia), where it was also found in the biotite matrix, has, according to a chemical composition, two times lower content of rare earth

elements. However, the content of thorium oxide is twice that of cheralite from God's Lake [7]. In the photographs after mapping chemical elements, we observe the zoning of the mineral, cerium tends to the central part of the cheralite grain, and yttrium is concentrated in its marginal parts, and as a result, it passes from the cerium variety to the yttrium one as it crystallizes from the melt. Thorium also has a slightly higher content in the center of the grain, then it is evenly distributed (fig. 5, *b*). The presence of rare earth elements in its composition speaks in favor of the magmatic origin of this mineral.

Discussion of the obtained data

In the leucogranites of the Peshcherninsky stock, apatite is represented by a fluorine variety, the main impurity element of which is manganese. In the 2018 article by A. Shushkevich et al. [16], the authors talk about the genesis of manganese-rich

Table 2. Chemical composition of monazite from leucogranites of the Peshcherninsky stock, wt. %
Таблица 2. Химический состав монацита из лейкогранитов Пещернинского штока, мас. %

Oxides	Analysis number								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
P ₂ O ₅	29,14	28,90	28,23	28,45	28,14	28,89	28,89	29,88	28,51
UO ₂	0,42	0,51	0,39	0,06	0,04	0,06	0,08	0,20	–
ThO ₂	7,03	5,41	6,49	5,79	5,14	7,05	7,06	5,60	41,38
SiO ₂	0,72	0,54	0,76	0,68	0,87	0,95	1,17	0,53	1,4
Yb ₂ O ₃	0,13	0,21	0,10	0,05	0,16	0,25	0,08	0,04	0,31
Tm ₂ O ₃	0,05	0,01	0,03	0,05	0,07	0,02	0,12	0,11	0,24
Dy ₂ O ₃	0,82	0,88	0,65	0,63	0,11	0,83	0,83	0,51	0,47
Gd ₂ O ₃	1,49	1,11	0,98	1,07	0,96	1,99	1,56	1,04	0,57
Eu ₂ O ₃	0,13	0,08	0,10	0,17	0,15	0,08	0,31	0,54	–
Sm ₂ O ₃	3,50	3,19	2,96	3,71	2,37	4,55	4,95	3,52	1,76
Nd ₂ O ₃	10,12	10,23	9,83	11,03	10,62	11,84	11,81	10,12	3,11
Pr ₂ O ₃	3,20	3,54	2,99	3,34	3,35	3,79	3,43	3,10	0,85
Ce ₂ O ₃	25,95	26,98	27,40	27,80	29,05	25,58	25,85	27,32	6,96
La ₂ O ₃	13,19	14,05	14,62	12,60	15,21	10,71	11,09	14,31	3,73
Y ₂ O ₃	3,05	3,05	2,58	2,32	1,14	3,47	2,92	2,26	1,56
PbO	0,15	0,13	0,13	0,09	0,11	0,13	0,11	0,13	0,14
SrO	0,22	0,21	0,20	–	0,25	–	0,20	0,22	0,41
MnO	0,58	0,56	0,61	0,61	0,62	0,70	0,69	0,61	0,15
CaO	1,07	0,90	0,72	0,82	0,63	0,79	1,06	1,11	8,22
Total	100,96	100,49	99,77	99,27	98,99	101,68	102,21	101,15	99,77

Crystal chemical formulas

1	(Ce _{0,39} ,La _{0,20} ,Nd _{0,15} ,Y _{0,07} ,Pr _{0,05} ,Sm _{0,03} ,Th _{0,03} ,Ca _{0,02} ,Gd _{0,02} ,Dy _{0,01} ,Mn _{0,01}) _{0,98} [(P _{1,01} ,Si _{0,01}) _{1,02} O _{4,00}]
2	(Ce _{0,40} ,La _{0,21} ,Nd _{0,15} ,Y _{0,07} ,Pr _{0,05} ,Th _{0,03} ,Sm _{0,02} ,Ca _{0,02} ,Gd _{0,02} ,Dy _{0,01} ,Mn _{0,01}) _{0,99} [(P _{1,00} ,Si _{0,01}) _{1,01} O _{4,00}]
3	(Ce _{0,41} ,La _{0,22} ,Nd _{0,15} ,Y _{0,06} ,Pr _{0,05} ,Th _{0,03} ,Sm _{0,03} ,Ca _{0,02} ,Gd _{0,01} ,Dy _{0,01} ,Mn _{0,01}) _{0,99} [(P _{0,99} ,Si _{0,02}) _{1,01} O _{4,00}]
4	(Ce _{0,40} ,La _{0,21} ,Nd _{0,15} ,Y _{0,05} ,Pr _{0,05} ,Sm _{0,03} ,Th _{0,03} ,Ca _{0,02} ,Gd _{0,01} ,Dy _{0,01} ,Mn _{0,01}) _{0,97} [(P _{1,02} ,Si _{0,01}) _{1,03} O _{4,00}]
5	(Ce _{0,42} ,La _{0,19} ,Nd _{0,16} ,Y _{0,05} ,Pr _{0,05} ,Sm _{0,03} ,Th _{0,03} ,Ca _{0,02} ,Gd _{0,01} ,Dy _{0,01} ,Mn _{0,01}) _{0,98} [(P _{1,00} ,Si _{0,01}) _{1,01} O _{4,00}]
6	(Ce _{0,38} ,Nd _{0,17} ,La _{0,16} ,Y _{0,08} ,Pr _{0,06} ,Sm _{0,03} ,Th _{0,03} ,Gd _{0,03} ,Ca _{0,02} ,Dy _{0,01} ,Mn _{0,01}) _{0,98} [(P _{1,00} ,Si _{0,02}) _{1,02} O _{4,00}]
7	(Ce _{0,38} ,Nd _{0,17} ,La _{0,17} ,Y _{0,06} ,Pr _{0,05} ,Sm _{0,04} ,Th _{0,03} ,Gd _{0,02} ,Ca _{0,02} ,Dy _{0,01} ,Mn _{0,01}) _{0,96} [(P _{1,00} ,Si _{0,02}) _{1,02} O _{4,00}]
8	(Ce _{0,44} ,La _{0,23} ,Nd _{0,16} ,Pr _{0,05} ,Y _{0,03} ,Sm _{0,02} ,Th _{0,02} ,Ca _{0,01} ,Gd _{0,01} ,Mn _{0,01}) _{0,98} [(P _{0,99} ,Si _{0,02}) _{1,01} O _{4,00}]
9	(Th _{0,22} ,Ca _{0,20} ,Ce _{0,12} ,La _{0,06} ,Nd _{0,05} ,Y _{0,04} ,Dy _{0,01} ,Gd _{0,01} ,Sm _{0,01} ,Pr _{0,01} ,Sr _{0,01}) _{0,73} [(P _{1,12} ,Si _{0,03}) _{1,15} O _{4,00}]

Table 3. Chemical composition of xenotime from leucogranites of the Peshcherninsky stock, wt. %
Таблица 3. Химический состав ксенотима из лейкогранитов Пещернинского штока, мас. %

Oxides	Analysis number		
	1	2	3
P ₂ O ₅	33,22	31,90	31,85
UO ₂	0,16	0,61	0,59
ThO ₂	0,71	0,78	0,66
TiO ₂	0,35	0,09	0,15
SiO ₂	0,52	0,54	0,82
Yb ₂ O ₃	4,07	4,38	4,00
Tm ₂ O ₃	0,64	0,97	0,58
Er ₂ O ₃	3,51	3,56	3,47
Dy ₂ O ₃	3,89	4,42	4,10
Gd ₂ O ₃	4,15	4,95	3,84
Y ₂ O ₃	48,30	46,62	45,82
CaO	0,22	0,17	0,13
Total	99,74	98,99	96,01

Crystal chemical formulas

1	(Y _{0,87} ,Gd _{0,05} ,Dy _{0,04} ,Yb _{0,04} ,Er _{0,04} ,Tm _{0,01}) _{1,05} [(P _{0,95} ,Si _{0,01}) _{0,96} O _{4,00}]
2	(Y _{0,86} ,Gd _{0,06} ,Dy _{0,05} ,Yb _{0,05} ,Er _{0,04} ,Tm _{0,01}) _{1,07} [(P _{0,94} ,Si _{0,01}) _{0,95} O _{4,00}]
3	(Y _{0,86} ,Dy _{0,05} ,Gd _{0,04} ,Yb _{0,04} ,Er _{0,04} ,Tm _{0,01}) _{1,04} [(P _{0,95} ,Si _{0,01}) _{0,96} O _{4,00}]

apatites in pegmatites. They describe the specific geotectonic position of this pegmatite, which is located at the boundary of crustal and oceanic rocks in the central part of the Sudetensky accretionary complex, which is a decisive factor involved in creating a favorable environment for the melting of metasedimentary rocks, which became the source of melt for these pegmatites [16]. In other words, the presence of manganese is a characteristic feature for sedimentary and metasedimentary rocks. The presence of an admixture of manganese in the apatites of the Pescherninsky stock may indicate that during intrusion there was a partial mixing of the initial melt with the crustal substance and its assimilation.

Intergrowths of xenotime with zircon are observed in the rock, it is assumed that these minerals are among the first to crystallize from the melt, controlling heavy rare earth elements, followed by crystallization of monazite group minerals,

taking light rare earth elements. Apatite can crystallize at different stages of mineral formation; it occurs in rocks as inclusions in magnetite, biotite, plagioclase, and potassium feldspar.

Thus, for the first time in Russia, cheralite was found and described in a plutonic rock. In the leucogranites of the Pescherninsky stock, apatite, monazite, and xenotime have been identified and studied. Data on the chemical composition of minerals were obtained: apatite belongs to the fluorine variety and contains an admixture of manganese, monazite is assigned to the cerium (Ce) variety, and xenotime is assigned to the yttrium (Y) variety. Cheralite has a transitional composition of the main impurity elements, from Ce to Y. The order of crystallization of phosphates in leucogranite of the Pescherninsky stock, as well as mineral associations: xenotime with zircon, cheralite with monazite, has been established.

The studies were carried out within the framework of the State Assignment of the IGG UB of the Russian Academy of Sciences, on the state budget topic "Tectonics, geodynamics, evolution and minerageny of structural-material complexes that arose during the formation of the continental crust (using the example of the Paleozoic Ural-Mongolian mobile belt and the West Siberian plate)" using equipment of the Common Use Center Geoanalyst of the IGG UB of the Russian Academy of Sciences. The retrofitting and comprehensive development of the Common Use Center Geoanalyst of the IGG UB of the Russian Academy of Sciences is carried out with the financial support of a grant from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Agreement no. 075-15-2021-680.

REFERENCES

1. Sun S. S., McDonough W. F. 1989, Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. *Geological Society, London, Special Publications*, vol. 42, no. 1, pp. 313–345. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19>
2. Bowie S. H. U. Horne J. E. T. 1953, Cheralite, a new mineral of the monazite group. *Mineralogical Magazine*, vol. 30, issue 221, pp. 93–99. <https://doi.org/10.1180/minmag.1953.030.221.02>
3. Pekov I. V. 2002, Bismuth-bearing brabantite from rare-metal pegmatites of Lipovka, Middle Urals. *Ural'skiy geologicheskii zhurnal* [Ural Geological Journal], no. 5 (29), pp. 119–128. (In Russ.)
4. Linthout K. 2007, Tripartite division of the system $2\text{REEPO}_4\text{-CaTh}(\text{PO}_4)_2\text{-2ThSiO}_4$, discreditation of brabantite, and recognition of cheralite as the name for members dominated by $\text{CaTh}(\text{PO}_4)_2$. *The Canadian Mineralogist*, vol. 45(3), pp. 503–508. <http://dx.doi.org/10.2113/gscanmin.45.3.503>
5. Shagalov E. S., Stepanov S. Yu., Veretennikova T. Yu. 2018, On the mineralogy of the Berezovsky gold deposit (Middle Urals): sulfides and minerals of thorium and uranium. *Ural'skaya mineralogicheskaya shkola* [Ural Mineralogical School], no. 24, pp. 252–259. (In Russ.)
6. Azovskova O. B., Rovnushkin M. Yu., Bairamgalina L. N., Gemel V. A. 2019, Uranium and thorium mineralization in the ores of the Mikheevsky porphyry copper deposit, Southern Urals. *Metallogeniya drevnikh i sovremennykh okeanov* [Metallogeny of ancient and modern oceans], no. 1, pp. 114–117. (In Russ.)
7. Mills S. J., Birch W. D., Maas R., Plimer I. R. 2008, Lake Boga Granite, northwestern Victoria: mineralogy, geochemistry and geochronology. *Australian Journal of Earth Sciences: An International Geoscience Journal of the Geological Society of Australia*, vol. 55, issue 3, pp. 281–299. <https://doi.org/10.1080/08120090701769449>
8. State geological map of the Russian Federation. Scale 1:1 000 000 (new series). Sheet O-40, (41). Ekaterinburg, 1997, 252 p. (In Russ.)
9. Smirnov V. N. 1981, Gabbro-granitoid series of the Eastern zone of the Urals. *Doklady AN SSSR* [Reports of the Academy of Sciences of the USSR], vol. 259, no. 6, pp. 1453–1457. (In Russ.)
10. 1984, Eugeosynclinal gabbro-granitoid series. G. B. Fershtater [et al.]. Moscow, 264 p. (In Russ.)
11. Lobova E. V. 2013, Silurian intrusive magmatism in the Eastern zone of the Middle Urals, PhD thesis. Saint Petersburg, 20 p. (In Russ.)
12. Smirnov V. N., Ivanov K. S., Ronkin Yu. L., Serov P. A., Gerdes A. 2018, Sr, Nd, and Hf isotope composition of rocks of the Reft gabbro-diorite-tonalite complex (Eastern slope of the Middle Urals): petrological and geological implications. *Geokhimiya* [Geochemistry], no. 6, pp. 499–513. (In Russ.)
13. Smirnov V. N., Nastavko E. V., Ivanov K. S., Bayanova T. B., Rodionov N. V., Serov P. A. 2014, Results of isotopic dating of rocks of the Reft gabbro-diorite-tonalite complex. *Litosfera* [Lithosphere], no. 5, pp. 3–18. (In Russ.)
14. Fershtater G. B., Krasnobaev A. A., Bea F., Montero P., Borodina N. S., Kholodnov V. V., Zinkova E. A., Shardakova G. Yu., Pribavkin S. V. 2007, Stages of the Paleozoic intrusive magmatism of the Ural orogen and their geodynamic interpretation. Geodynamics, magmatism, metamorphism and ore formation. Collection of scientific papers. Ekaterinburg, pp. 89–120. (In Russ.)
15. Kazakov I. I., Storozhenko E. V., Kharitonov I. N., Stefanovsky V. V., Koshevoy Yu. N., Kozmin S. V., Martynov S. E., Fadeicheva I. F., Ronkin Yu. L., Lukin V. G. 2017, State Geological Map of the Russian Federation, scale 1:200 000 (second edition). Series Middle Ural. Sheet O-41-XXVI. Explanatory letter. Saint Petersburg, 284 p. (In Russ.)
16. Szuszkiewicz A., Pieczka A., Gołębiewska B., Dumańska-Słowik M., Marszałek M., Szełęg E. 2018, Chemical Composition of Mn- and Cl-Rich Apatites from the Szklary Pegmatite, Central Sudetes, SW Poland: Taxonomic and Genetic Implications. *Minerals*, vol. 8 (8), pp. 1–21. <https://doi.org/10.3390/min8080350>

The article was received on January 20, 2023

Фосфатная минерализация в лейкогранитах Пещернинского штока (Рефтинский массив, Средний Урал)

Дмитрий Дмитриевич КОРОВИН*

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

Аннотация

Актуальность. Фосфатная минерализация девонских интрузий Восточной зоны Среднего Урала в настоящее время слабо изучена, полученные данные могут иметь значение для интерпретации происхождения горных пород, особенно в том случае, когда стандартные методы геохимического анализа горных пород не дают ясной картины. Ксенотим и монацит являются минералами-концентраторами редкоземельных элементов, а графики распределения РЗЭ являются весьма важной характеристикой горных пород.

Цель работы – изучение химического состава фосфатов в лейкогранитах Пещернинского штока.

Методология исследования. Определение химического состава образцов выполнено на электронно-зондовом микроанализаторе Cameca SX100 в ЦКП «Геоаналитик», аналитик В. А. Булатов. Анализ проводился при ускоряющем напряжении 15 кВ с использованием кристаллов-анализаторов TAP, LPCO, LPET, PET, LLIF, LIF. Ток электронного зонда – 10 нА (апатит) и 60 нА (РЗЭ, Th фосфаты). Время накопления импульсов в максимуме пика составило 10 с (для большинства элементов) и 20 с (для РЗЭ, Th, U, Pb). При проведении анализа на электронно-зондовом микроанализаторе Cameca SX100 в качестве стандартов использовались: апатит (для анализа содержания P, Ca), хлорапатит (Cl), фтор-флогопит (F), диопсид (Mg, Si), альбит (Na, Al), ортоклаз (K), родонит (Mn), SrSO₄ (Sr), TiO₂ (Ti), Fe₂O₃ (Fe), SrSO₄ (Sr), BaSO₄ (S), Cr₂O₃ (Cr), пироморфит (Pb) и алюмосиликатные стекла, легированные РЗЭ (La, Ce, Y, Sm, Pr, Nd, Th, U, Tm, Eu, Tb, Dy, Gd, Er, Yb, Lu, Ho). Из-за использования низкого тока зонда при анализе апатитов пределы обнаружения элементов составили: 300–600 ppm для S, Cl, Al, Mg, Si, Ca, Na и 2000–2500 ppm для P, F, Fe, Mn, Cr. Для РЗЭ фосфатов при помощи повышенного тока зонда были достигнуты следующие пределы обнаружения: 100–200 ppm для Si, Ca, Cr, K, Al, Mg, Ti, Pb, 300–500 ppm для Na, S, P, Mn, Y, Th, U, 1200–1500 ppm для Sr, Nd, Ce, 1700–2000 ppm для La, Tm, Tb, 2500–2800 ppm для Yb, Dy, Lu, Pr, 3500–4700 ppm для Eu, Sm, Gd, Ho.

Результаты. Впервые в России найден и описан чералит в плутонической горной породе. В статье приведены первые данные по химическому составу фосфатов (апатит, монацит, ксенотим, чералит) из лейкогранитов Пещернинского штока, образовавшегося на завершающем этапе формирования полихронного и полиформационного Рефтинского габбро-гранитоидного массива.

Заключение. Апатит относится к фтористой разновидности с примесью марганца, монацит представлен цериевой разновидностью, а ксенотим – иттриевой. Чералит обладает переходным микроэлементным составом, и в зависимости от зоны его можно относить как к цериевой, так и к иттриевой разновидности. Примесь марганца в апатите может свидетельствовать о частичном смешении расплава с осадочными или метаосадочными породами.

Ключевые слова: фторапатит, монацит-(Ce), ксенотим-(Y), чералит, лейкограниты, Рефтинский массив, Средний Урал.

Исследования выполнены в рамках Государственного задания ИГГ УрО РАН по госбюджетной теме «Тектоника, геодинамика, эволюция и минералогия структурно-вещественных комплексов, возникших при формировании континентальной земной коры (на примере палеозойского Урало-Монгольского подвижного пояса и Западно-Сибирской плиты)» с использованием оборудования ЦКП «Геоаналитик» ИГГ УрО РАН. Дооснащение и комплексное развитие ЦКП «Геоаналитик» ИГГ УрО РАН осуществляется при финансовой поддержке гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Соглашение № 075-15-2021-680.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sun S. S., McDonough W. F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes // Geological Society, London, Special Publications. 1989. Vol. 42. № 1. P. 313–345. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19>
2. Bowie S.H.U., Horne J.E.T. Cheralite, a new mineral of the monazite group // Mineralogical Magazine. 1953. Vol. 30. Issue 221. P. 93–99. <https://doi.org/10.1180/minmag.1953.030.221.02>
3. Пеков И. В. Висмутосодержащий брабантит из редкометалльных пегматитов Липовки, Средний Урал // Уральский геологический журнал. 2002. № 5 (29). С. 119–128.

*korovin@igg.uran.ru

4. Linthout K. Tripartite division of the system $2\text{REEPO}_4\text{-CaTh}(\text{PO}_4)_2\text{-2ThSiO}_4$, discreditation of brabantite, and recognition of cheralite as the name for members dominated by $\text{CaTh}(\text{PO}_4)_2$ // The Canadian Mineralogist. 2007. Vol. 45(3). P. 503–508. <http://dx.doi.org/10.2113/gscanmin.45.3.503>
5. Шагалов Е. С., Степанов С. Ю., Веретенникова Т. Ю. К минералогии Берёзовского золоторудного месторождения (Средний Урал): сульфиды и минералы тория и урана // Уральская минералогическая школа. 2018. № 24. С. 252–259.
6. Азовскова О. Б., Ровнушкин М. Ю., Байрамгалина Л. Н., Гемель В. А. Урановая и ториевая минерализация в рудах Михеевского медно-порфирирового месторождения, Южный Урал // Металлогения древних и современных океанов. 2019. № 1. С. 114–117.
7. Mills S. J., Birch W. D., Maas R., Phillips D., Plimer I. R. Lake Boga Granite, northwestern Victoria: mineralogy, geochemistry and geochronology // Australian Journal of Earth Sciences: An International Geoscience Journal of the Geological Society of Australia. 2008. Vol. 55. Issue 3. P. 281–299. <https://doi.org/10.1080/08120090701769449>
8. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (новая серия). Лист О-40, (41): объяснит. записка. Екатеринбург: Уралгеолком, УГСЭ, 1997. 252 с.
9. Смирнов В. Н. Габбро-гранитоидные серии Восточной зоны Урала // Докл. АН СССР. 1981. Т. 259. № 6. С. 1453–1457.
10. Эвгеосинклинальные габбро-гранитоидные серии / Г. Б. Ферштатер [и др.]. М.: Наука, 1984. 264 с.
11. Лобова Е. В. Силурийский интрузивный магматизм Восточной зоны Среднего Урала: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. СПб: НМСУ «Горный», 2013. 20 с.
12. Смирнов В. Н., Иванов К. С., Ронкин Ю. Л., Серов П. А., Гердес А. Изотопный состав Sr, Nd и Hf в породах Рефтинского габбро-диорит-тоналитового комплекса (Восточный склон Среднего Урала): петрологические и геологические следствия // Геохимия. 2018. № 6. С. 499–513.
13. Смирнов В. Н., Наставко Е. В., Иванов К. С., Баянова Т. Б., Родионов Н. В., Серов П. А. Результаты изотопного датирования пород Рефтинского габбро-диорит-тоналитового комплекса, Восточная зона Среднего Урала // Литосфера. 2014. № 5. С. 3–18.
14. Ферштатер Г. Б., Краснобаев А. А., Беа Ф., Монтеро П., Бородин Н. С., Холоднов В. В., Зинькова Е. А., Шардакова Г. Ю., Прибавкин С. В. Этапы палеозойского интрузивного магматизма Уральского орогена и их геодинамическая интерпретация // Геодинамика, магматизм, метаморфизм и рудообразование: сборник науч. трудов. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2007. С. 89–120.
15. Казаков И. И., Стороженко Е. В., Харитонов И. Н., Стефановский В. В., Кошевой Ю. Н., Козьмин С. В., Мартынов С. Э., Фадеева И. Ф., Ронкин Ю. Л., Лукин В. Г. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200 000 (изд. 2-е). Сер. Средне-Уральская. Лист О-41-XXVI (Асбест): объяснит. записка. СПб: Картограф. фабрика ВСЕГЕИ, 2017. 284 с.
16. Szuszkiewicz A., Pieczka A., Gołębiewska B., Dumańska-Słowik M., Marszałek M., Szełęg E. Chemical Composition of Mn- and Cl-Rich Apatites from the Szklary Pegmatite, Central Sudetes, SW Poland: Taxonomic and Genetic Implications // Minerals. 2018. Vol. 8(8). P. 1–21. <https://doi.org/10.3390/min8080350>

Статья поступила в редакцию 20 января 2023 года

Сылвенский комплекс флюидолитов Юрюзано-Сылвенской депрессии (Свердловская область)

Владимир Александрович ДУШИН*
Денис Игоревич ПРОКОПЧУК**
Сергей Геннадьевич СУСТАВОВ***
Артем Константинович ТРУТНЕВ****
Евгений Александрович ЖУКЛИН*****

Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия

Аннотация

Объект исследования. В статье приводится характеристика впервые закартированного алмазодержащего Сылвенского комплекса флюидолитов, установленного в области сочленения восточного крыла Юрюзано-Сылвенской депрессии и Западно-Уральской надвиговой зоны (истоки р. Сылва).

Материалы и методы. Работа основана на результатах собственных исследований, обобщении материалов по геологии и петрографии вмещающих породных комплексов, их структурно-тектонической позиции в зоне влияния Главного Западно-Уральского надвига. В статье использованы результаты исследований на сканирующем электронном микроскопе VEGA LMS фирмы TESCAN с энергодисперсионной приставкой Xplore 30 фирмы Oxford Instruments и рентгеновской установке УРС-55 в камере РКД в лаборатории УГГУ, а также на дифрактометре XRD-7000 и спектрометре СРМ-35 и EDX-8000 фирмы Shimadzu в ЦКП «Геоаналитик» Института геологии и геохимии УрО РАН.

Результаты. Авторами проведено минералого-петрографическое изучение продуктивных на алмазы грубообломочных пород, идентифицированных как флюидолиты, показан их вероятный флюидно-магматический генезис, на что указывают как структурно-текстурные, так и минералогические особенности вулканокластитов, включая акцессорные минералы-индикаторы алмазоносности, а также присутствие каплевидных, эллипсообразных выделений вулканического стекла, пульпообразный, тонкодисперсный характер основной массы, несортированные, слабоокатанные до остроугольных обломки магматических и осадочных пород. Показан химический состав флюидолитов, определяющий их геодинамическую принадлежность и близость к алмазоносным туффизитам Вишерского района. Дано рентгеновское определение как алмаза, так и вмещающего Сылвенского комплекса.

Выводы. Полученные данные свидетельствуют о вероятном проявлении фреатического вулканизма, приведшего к транспортировке флюидолитами алмаза и его спутников в ослабленную активизированную зону перед фронтом Главного Западно-Уральского надвига.

Ключевые слова: алмаз, нижняя пермь, туфобрекчии, флюидолиты, микросферулы, Юрюзано-Сылвенская депрессия, Главный Западно-Уральский надвиг, Сылвенский комплекс.

Введение

Основной минерально-сырьевой базы уральской алмазодобывающей отрасли до настоящего времени считаются современные и погребенные россыпи, первоисточниками сырья в которых предполагаются груботерригенные толщи федоровской (RF_3), основания колчимской (S_1) и такатинской (D_2) свит, кимберлиты или лампроиты восточного обрамления Русской платформы [1, 2]. Не исключается и вклад щелочно-базит-ультрабазитового магматизма Урала, включая кимберлиты (хартесский комплекс), лампроиты (сертынтинский и шарьюский (MZ), шеинский, ахмеровский комплексы), перидотиты (косьвинский комплекс). Отдельные исследователи предполагают метаморфоген-

ный (кумдыкольский тип) либо ударно-метаморфогенный (попигайский тип) коренных источников алмазов [3].

Важной вехой в вопросе выявления местных коренных источников кристаллосырья и значительного усиления геологических и тематических работ вызвало появление в 1995–1996 гг. «туффизитовой» концепции, предложенной пермскими геологами В. Г. Остроумовым и А. Я. Рыбальченко [4, 5], поддержанной геологами ВСЕГЕИ и ВНИИОкеангеологии Л. И. Лукьяновой, В. В. Жуковым и Федеральным агентством по недропользованию «Роснедра» (А. Ф. Морозов) и другими для объектов Красновишерского узла [6]. С этого времени актив-

✉ Vladimir.Dushin@m.ursmu.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-9657-6324>

**uva9090@mail.ru

***Sustavov.s@ursmu.ru

****tema.trutnev@yandex.ru

*****zhuklin7@gmail.com

но началась переработка и переосмысление материалов предшествующих работ, в которой участвовали геологи Пермьгеолодобыча и АО «Уралалмаз», ВСЕГЕИ, ПГГ СП Геокарат, ИГЕМ, ТОО «Прогноз Д», УКГСЭ, ИГ и М (Миасс), ЦНИГРИ, ИГ Коми ФАН, СНИГЭ (УГГУ), ПГУ (г. Пермь) и др. [7–10]. Как показали проведенные исследования, алмазы из уральских россыпей весьма своеобразны и отличаются от кристаллосырья других провинций своей морфологией (округлые формы), повышенным средним весом, изотопным составом, высоким ювелирным качеством и т. д., что наряду с исследованием вероятных областей питания и тенденцией переноса материала указывало на местный источник формирования известных месторождений Красновишерского района [11]. Этот вывод был дополнен материалами о присутствии в районе своеобразного фреатического вулканизма и особенностями глубинного строения Западно-Уральской надвиговой мегазоны. Последняя представляет собой окраину сложнопостроенной палеорифтовой структуры, сформированной на гетерогенном архейско-раннепротерозойском основании [6, 12, 13].

В настоящее время в Западно-Уральской минерагенической мегазоне выделяют следующие рудно-россыпные районы: Ныробский, Вишерский, Яйвинский, Нижнеусьвенский, Горнозаводской, Чусовской, Березовский, Велсовский, Койвинский и Бисертский. При этом только в Вишерском, Яйвинском, Горнозаводском районах установлены месторождения и проявления алмазов [6], которые послужили полигоном создания «туффизитовой» модели [14].

Алмазонасные туффизиты и ксенотуффизиты западного склона Урала предлагаются в качестве наиболее важного коренного источника алмазов эруптивно-эксплозивной природы, нередко претерпевших коровые процессы [10]. Наряду с пластообразными формами данные породы образуют трубчатые и дайково-жильные тела, что позволяло геологам считать их магматическими образованиями, близкими к трубкам взрыва. По мнению Г. Н. Кузовкова, эти породы следует относить к аллогенным, импактным образованиям, являющимся аналогами бразильских филлитов [3].

Таким образом, судя по литературным источникам [3, 6], включая наши исследования по Полярному и Приполярному Уралу [15], вопросы происхождения первоисточников алмазов остаются до настоящего времени дискуссионными. В связи с этим находка нами алмаза в своеобразных кластогенных экструзивных породах (флюидолитах), прорывающих нижнепермские отложения, позволяет уточнить понимание проблемы первоисточников алмазов.

Методика исследований

Данная публикация посвящена геологическому строению восточного крыла Юрюзано-Сылвенской депрессии Предуральского прогиба и характеристике экструзивного тела Сылвенского комплекса как возможного источника обнаруженного алмаза. Работы проводились в рамках геологического доизучения листа О-40-XXIX (Шалинская площадь) масштаба 1:200 000 (ГДП-200/2) и программы «Приоритет 2030 ФГБОУ ВО УГГУ на 2021–2030 гг.». Исследования включали широкий круг задач – от изучения литологии, петрографии, петрохимии пород до выяснения их геохимического, минералогического составов, а также геологического строения, тектонических и геоморфологических особенностей территории.

Изучение морфологии, внутреннего строения, химического состава как алмаза, так и вмещающих породных комплексов осуществлено в лабораториях ФГБОУ ВО УГГУ. Морфологическое изучение кристалла было проведено с помощью сканирующего электронного микроскопа VEGA LMS фирмы TESCAN с энергодисперсионной приставкой Xplore 30 фирмы Oxford Instruments, при определении состава использовался BSE детектор $U = 20$ kV, $I = 3$ nA (аналитик И. А. Власов, ФГБОУ ВО УГГУ). Рентгенографическое исследование выполнено методом монокристалла на установке УРС-55 в камере РКД, излучение $Fe\alpha + \beta$, $U = 40$ kV, $I = 10$ mA (аналитик С. Г. Сустанов, ФГБОУ ВО УГГУ) и с помощью рентгеновского дифрактометра XRD 7000 (Shimadzu) в области углов θ от 3 до 70 град, режим работы трубки 40 kV, 30 Ma, рентгенофлуоресцентный энергодисперсионный метод на спектрометрах CPM-35 и EDX-8000 (Shimadzu) в лаборатории Института геологии и геохимии УрО РАН. Петрографические работы проведены на микроскопах DM2700P, S9i, M205C фирмы Leica.

Объект исследования

В геологическом строении рассматриваемой территории, расположенной в истоках р. Сылвы, принимают участие осадочные отложения восточной приконтактной части Юрюзано-Сылвенской депрессии Предуральского прогиба и западные фрагменты Западно-Уральской структурно-формационной мегазоны, представленные породами Язьвенско-Чусовской складчато-надвиговой зоны. Данные комплексы расчленены на ряд стратиграфических подразделений, почти повсеместно перекрытых маломощным чехлом четвертичных осадков. Наиболее древними породами района, слагающими Западно-Уральский сегмент, являются песчано-алевролит-карбонатные отложения уткинской свиты верхнего карбона, принадлежащие к глинисто-известково-доломитовой формации. Данные осадки локализованы в субпараллельных тектонических пластинах шириной 2–5 км (рис. 1).

При этом карбонатные отложения рифогенной природы, скорее всего, являются олистоплаками наряду с терригенными останцами нижнепермских осадков чигишанской и капысовской свит. Отложения Предуральской мегазоны в Юрюзано-Сылвенской депрессии представлены терригенными комплексами чигишанской ($P_1\check{c}g$), капысовской (P_1kp), бисертской (P_1bs) и белокатайской (P_1bk) свит гжелского, ассельского, сакмарского и артинского ярусов, содержащих широкий спектр фораминифер, миоспор, фузулинид, кораллов, мшанок и брахиопод. Основные перерывы в осадконакоплении установлены в основании капысовской и белокатайской свит. При этом последняя наряду с развитием псаммито-псефитовых осадков молассоидного типа, как правило, имеет нередко тектонические взаимоотношения с нижележащими комплексами. Обращает также на себя внимание проявление мезозойской линейной коры выветривания по отдельным швам Главного Западно-Уральского надвига [16].

В районе высоты 404,5 м в донной части карьера размером 40 × 120 м нами закартирован Сылвенский комплекс флюидогенно-эксплозивный ($\tau\beta T-Jsl$), прорывающий нижнепермские терригенные образования капысовской свиты (P_1kp) в пределах восточного крыла

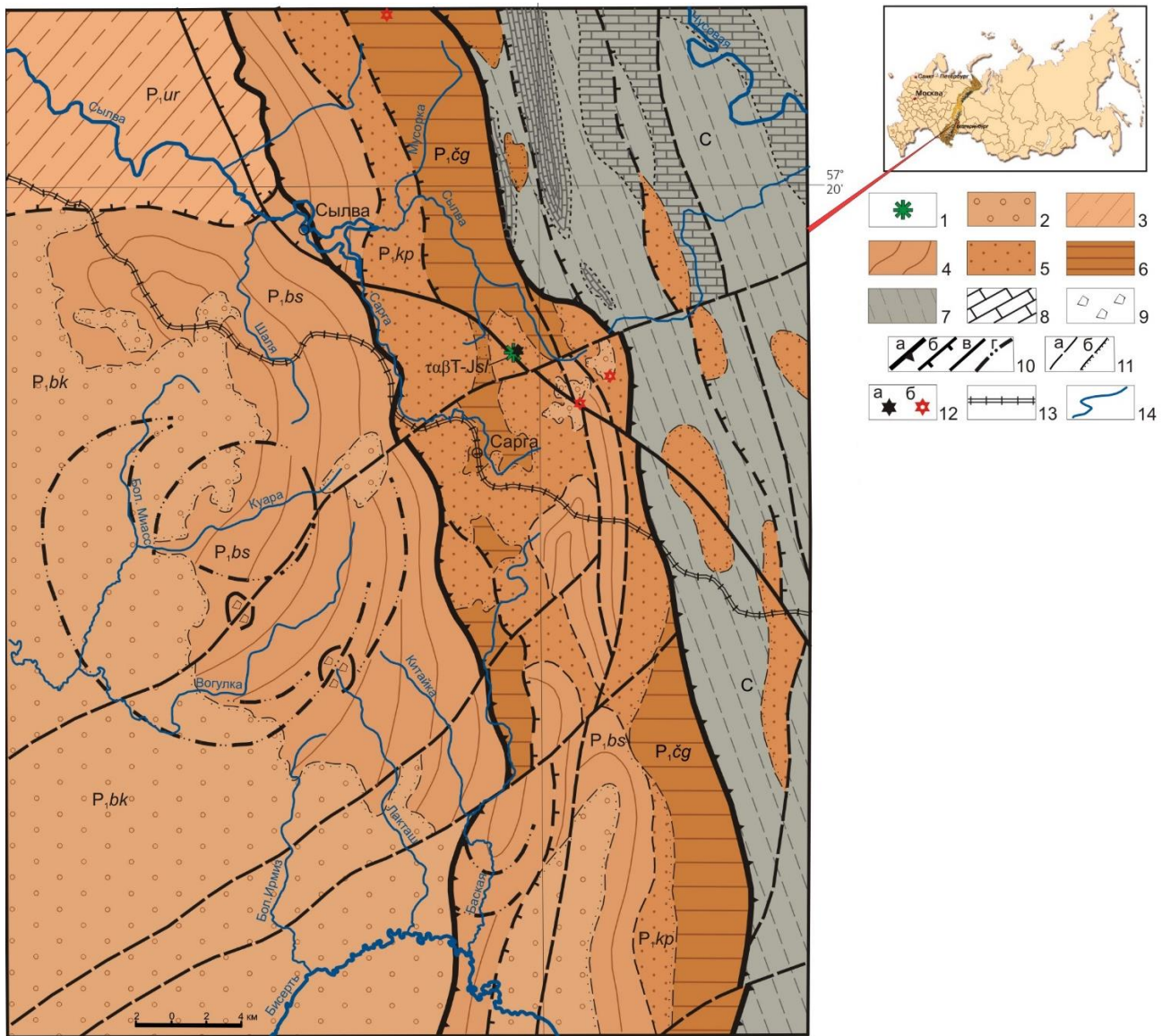


Рисунок 1. Геологическая карта междуречья Бисерти и Чусовой (составил В. А. Душин [16]): 1 – Сылвенский комплекс (таβТ–Jsl), флюидогенно-эксплозивные (флюидолиты) породы; 2 – белокатайская свита (P₁bk): алевролиты, песчаники, разногальчатые конгломераты, в том числе вулканомиктовые; 3 – урминская свита: алевролиты, прослои песчаников, мергелей, разногальчатые конгломераты; 4 – бисертская свита (P₁bs): алевролиты, аргиллиты, песчаники, прослои вулканомиктовых песчаников, конглобрекций; 5 – капысовская свита (P₁kr): алевролиты, песчаники, конгломераты, прослои аргиллитов, алевропесчаников, конглобрекций; 6 – чигишанская свита (P₁čg): полимиктовые песчаники, алевропесчаники, алевролиты, прослои и линзы известняков; 7 – нерасчлененные каменноугольные образования (C): известняки, алевролиты, алевропесчаники, прослои песчаников; 8 – известняки; 9 – брекчии глыбовые; 10 – тектонические нарушения: а – основной шов Главного Западно-Уральского надвига (ГЗУН), б – второстепенные швы ГЗУН, в – тектонические нарушения различной морфологии, г – элементы кольцевых структур; 11 – границы вещественных комплексов: а – согласные, б – несогласные; 12 – места находок алмазов в коренных (а) и аллювиальных (б) отложениях; 13 – железная дорога; 14 – реки

Figure 1. Geological map of the interfluvium of the Bisert and Chusovaya rivers (compiled by V. A. Dushin [16]): 1 – Sylvensky complex (таβТ–Jsl), fluidogenic-explosive (fluidolites) rocks; 2 – Belokatai suite (P₁bk): siltstones, sandstones, mixed-pebble conglomerates, including volcanomictic ones; 3 – Urma suite: siltstones, interlayers of sandstones, marls, mixed-pebble conglomerates; 4 – Bisert suite (P₁bs): siltstones, mudstones, sandstones, interlayers of volcanic sandstones, conglobreccias; 5 – Kapysovskaya Formation (P₁kr): silt-stones, sandstones, conglomerates, prolayers of mudstones, silty sandstones, conglobreccias; 6 – Chigishan suite (P₁čg): polymictic sandstones, silty sandstones, siltstones, limestone interlayers and lenses; 7 – undivided Carboniferous formations (C): limestones, silt-stones, silty sandstones, sandstone interlayers; 8 – limestones; 9 – blocky breccias; 10 – tectonic faults: a – main suture of the Main West Ural Thrust (MWUT), b – minor sutures of the GZUN, c – tectonic faults of different morphology, d – elements of ring structures; 11 – boundaries of real complexes: a – conformable, b – non-conformable; 12 – sites of diamond finds in bedrock (a) and alluvial (b) deposits; 13 – railway; 14 – rivers

Юрюзано-Сылвенской депрессии в зоне влияния Главного Западно-Уральского надвига (ГЗУН). Он локализован в узле пересечения Верхнебисертского и Сылвенского разломов (сателлиты ГЗУН) и их оперяющих трещин, активизированных в мезозое. Тело наиболее массивных флюидолитов мощностью 0,4–0,8 м сложной «крабовидной»

морфологии прослежено по простиранию на 30 м в виде отдельных щупальцеподобных сегментов мощностью до 0,1 м. Оно импрегнирует мелко-грубообломочный конгломерато-гравелито-песчанистый вмещающий комплекс пород капысовской свиты по субширотной зоне трещиноватости, образуя плосковершинный останец размером

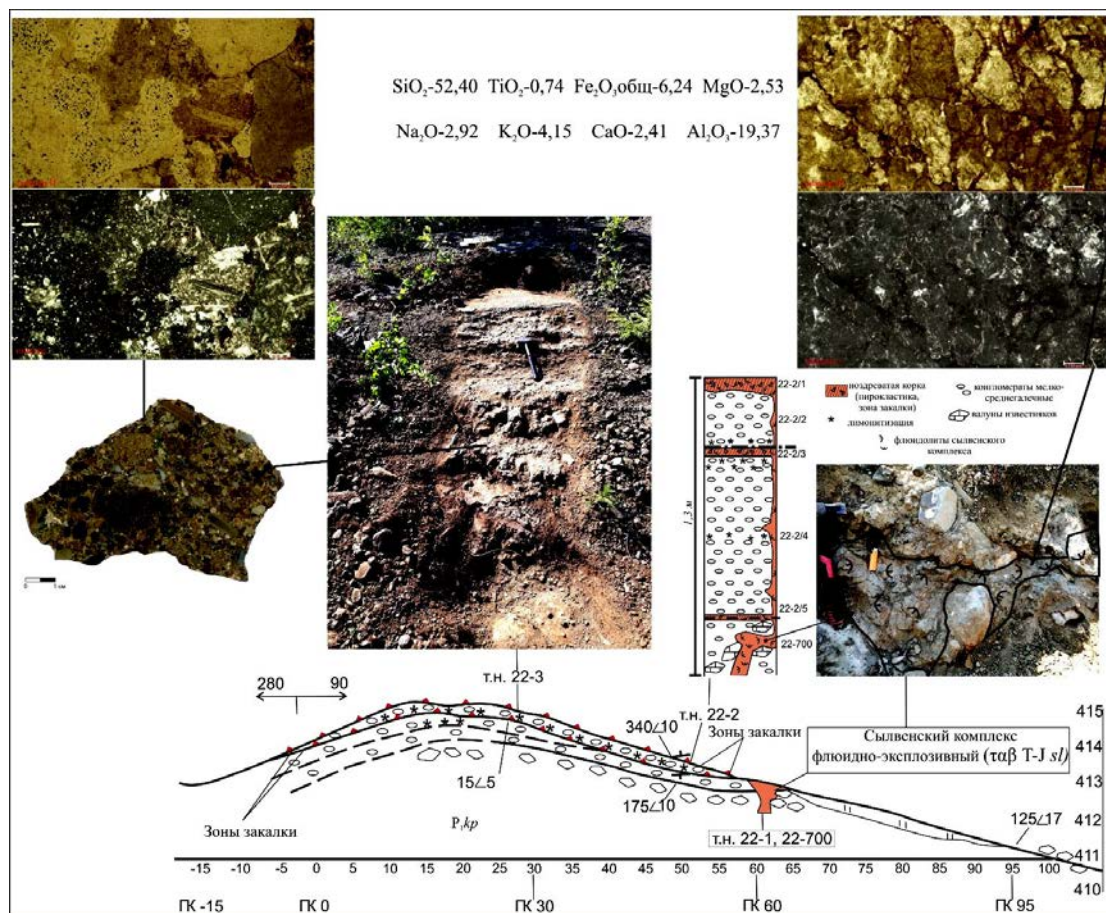


Рисунок 2. Геологическое строение и петрографическая характеристика Сылвенского комплекса (αβT-Js)
Figure 2. Geological structure and petrographic characteristics of the Sylvensky Complex (αβT-Js)

120 × 70 м и высотой до 5 м, напоминающий экструзивное тело (рис. 2).

Порода имеет зеленовато-серую окраску, массивную до брекчиевой текстуру, излом неровный, в шлифах микроструктура неравномернозернистая, текстура обломочная, брекчиевая, наблюдаются редкие порфириформные выделения. Минеральный состав: изотропные обломки анальцима, реже вулканического стекла с просечками и редкими прожилками кварц-карбонатного, карбонатного и хлоритового состава.

Рентгеновская диагностика порошковой пробы (рентгенофазовый анализ) показала наличие анальцима 27 %, около 62 % низкого санидина (рис. 3). Оптическими методами установлены стекло, гидрослюды (вермикулит) и лимонит. Аксессуарные минералы (по данным минералогического анализа) – магнетит, лейкоксен, рутил, апатит, лимонит, циркон. Кроме того, в протолочке обнаружены биотит, хлорит, амфибол, карбонат, плагиоклаз.

Анальцим (в шлифе) слабо окрашен в зеленовато-бурый цвет, изотропный, шагреневая поверхность отчетливая, неправильной формы, образует сравнительно крупные зерна размерами 0,1–0,3 мм. Показатели преломления ниже канадского бальзама.

Санидин (калишпат) окрашен в буровато-серые цвета из-за пелитизации, двупреломление колеблется от 0,006 до 0,007 Ng–Np, Ng – 1,530–1,531; Np – 1,524–1,527; обломки неправильной формы, часто в ассоциации с альбитом (Np – 1,528; Ng – 1,534; отмечены реликты двойников,

представленные альбит-олигоклазом Ng – 1,543–1,546; Np – 1,535–1,537).

Биотит, судя по показателям преломления Nm 1,610–1,620, относится к мероксену-лепидомелану (только в протолочках).

Амфибол отвечает роговой обманке Np – 1,655, Ng – 1,678 обнаружен только в протолочках.

По химическому составу, согласно TAS-диаграмме, порода, вероятнее всего, относится к трахиандезитобазальтам (рис. 4). Ее в основном анальцим-калишпатовый (низкий санидин) минералогический состав, содержащий стекло, биотит-вермикулит и амфибол, позволяет отнести породу к анальцимовым шошонитам, возможно, санидиновым анальцимитам (табл. 1).

Вопросы диагностики весьма затруднительны из-за брекчиевых текстур, приводящих к искажению истинного состава флюидолитов.

Согласно дискриминационным диаграммам, магматиты соответствуют образованиям, сформированным при континентальном рифтогенезе либо в условиях надспрединговых островов (рис. 4).

Геохимические особенности проявляются в повышенных содержаниях (Кк): Li, Be, Sc, As, U, Ag, Se, а остальные элементы находятся на нижекларковых значениях. Для более полной характеристики комплекса следует несколько слов сказать о его эксплозивной фации, которая представлена пирокластической

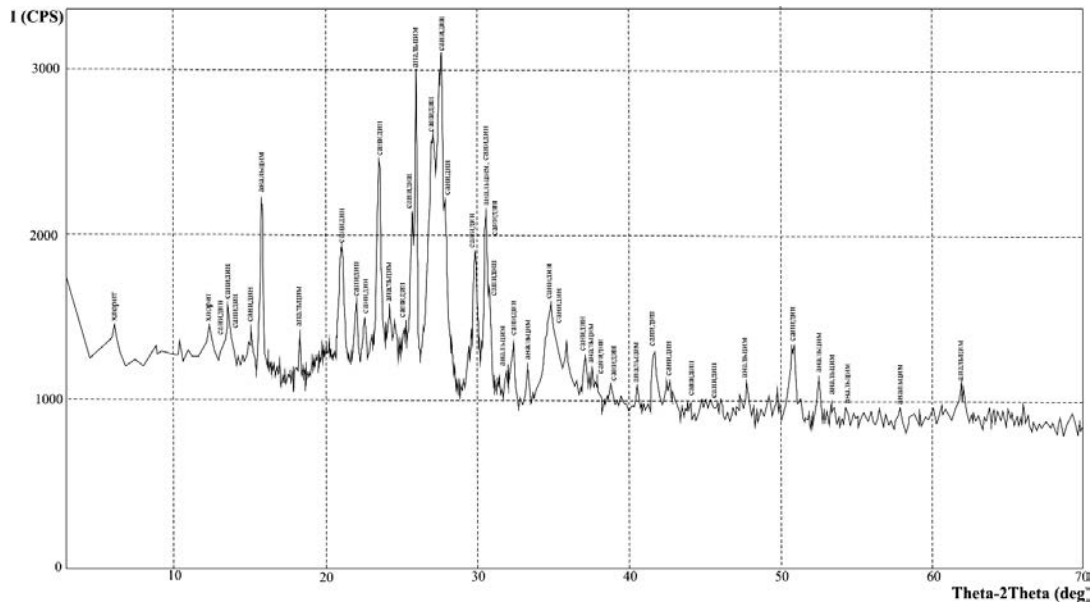


Рисунок 3. Дифрактограмма образца 22-1 (флюидолит), Сылвенский комплекс
 Figure 3. X-ray diffraction pattern of sample 22-1 (fluidolite), Sylvensky complex

Таблица 1. Содержание петрогенных оксидов в туффиитах Вишерского района (1–3) [16] и флюидолитах верховья р. Сылвы (4–6), мас. %

Table 1. Content of petrogenic oxides in tuffizites of the Vishersky region (1–3) [16] and fluidolites of the upper reaches of the river Sylva (4–6), wt %

Оксиды	Участки*			Верховья р. Сылвы**		
	Вольнка № 3	Южная Рассольная	Чурочная	18–50 цемент	18–205 цемент	22–700 порода
	1	2	3	4	5	6
SiO ₂	63,15	65,8	61,5	65,95	61,34	52,40
TiO ₂	0,82	0,70	0,73	0,552	0,693	0,74
Al ₂ O ₃	16,25	16,30	18,90	13,12	16,94	19,37
Fe ₂ O ₃ *	4,21	4,80	5,10	4,28	6,12	6,24
FeO	0,1	2,0	0,56	–	–	–
MnO	0,0044	0,016	0,033	0,08	0,125	0,177
MgO	1,65	2,2	1,5	1,65	1,81	2,63
CaO	1,54	0,38	0,58	3,25	1,19	2,41
Na ₂ O	0,04	1,1	1,2	3,36	3,94	2,92
K ₂ O	4,15	2,1	3,3	3,12	2,97	4,15
P ₂ O ₅	0,05	0,072	0,28	0,238	0,498	0,219
П.п.п.	6,35	4,0	6,4	4,2	4,4	8,32
Сумма	100,3	99,5	100,1	100,9	100,06	100,09

Примечание: *рентгеноспектральный анализ выполнен в лабораториях ВСЕГЕИ (1–3) и ЦКП «Геоаналитик» УрО РАН (4–6); ** Fe₂O₃ общее.

массой, пронизывающей вмещающие гравелито-конгломераты, участвующие, по-видимому, в едином эруптивном процессе. Мощности отдельных прослоев 0,5–1,2 м. Они залегают плащеобразно (аз. пад. 340° $\dot{\text{D}}$ 10°, 15° $\dot{\text{D}}$ 5°) и обнажаются к северу от субширотного линейного центра эрупции, сложенного собственно брекчиевыми флюидолитами, описанными ранее (рис. 2).

Это породы серо-светло-желтого цвета от крупно-мелкогалечной до галечно-щебнистой обломочной структуры и неяснослоистой брекчиевой текстуры.

В шлифах наблюдается неравномернозернистая, среднезернистая микроструктура и от массивной до брекчиевой текстура. В породах отсутствует сортировка по раз-

меру, и ксенолиты характеризуются различной степенью окатанности. Содержание обломков составляет от 80–85 до 90 %. Они обладают остроугольной, изометричной либо призматической формой. Наиболее крупные обломки (от 2–4 до 10 см) представлены кварцитами, кремнями, базальтами, трахитами, риолитами, известняками и алевролитами. Псаммитовая фракция сложена обломками кварцита, алевролита, песчаника, молочно-белого кварца, халцедона, опала, кавернозного известняка. Связующее вещество (матрица) составляет 7–10 % от объема породы и представлена лейстами плагиоклазов (25–30 %) от альбита до андезина, изометричными включениями кварца (20 %), чешуйками гастингсита (10 %), парагасита (5–7

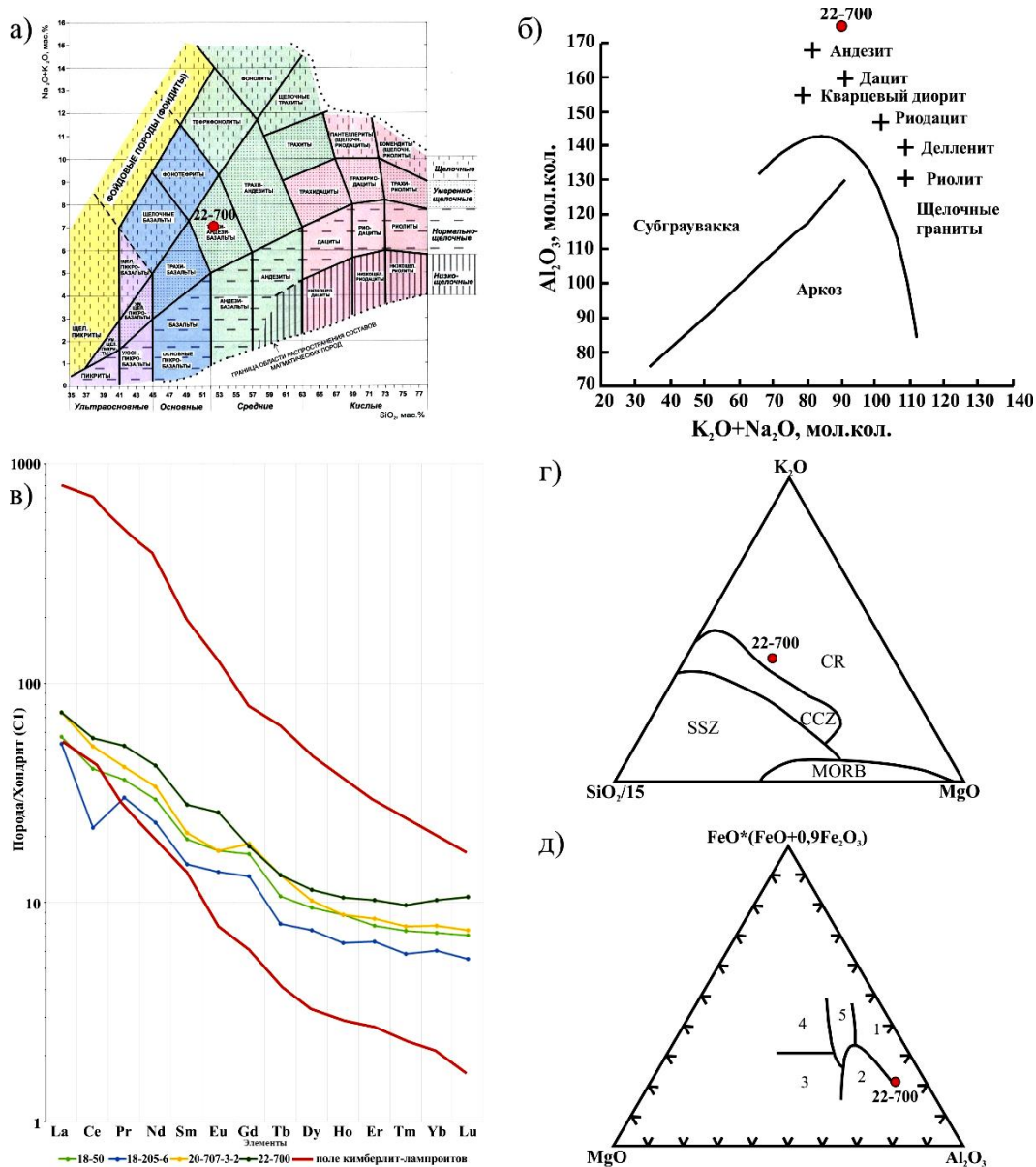


Рисунок 4. Классификационные диаграммы пород Сылвенского комплекса: а – TAS-диаграмма; б – диаграмма $Al_2O_3 - K_2O + Na_2O$ (молекулярное количество) для отличия обычных субграувак и аркозов от средних и кислых магматитов; в – хондрит-нормализованные спектры РЗЭ для пород Сылвенского комплекса; г – тройная дискриминационная диаграмма для вулканитов с использованием K_2O , SiO_2 , MgO [17]. Поля составов вулканитов: CR – континентальных рифтов, CCZ – областей межконтинентальной коллизии, MORB – срединно-океанических хребтов, SSZ – зон субдукции; д – тройная дискриминационная диаграмма для пород базальтового и андезитового состава $MgO - FeO - Al_2O_3$ (Pearce et al., 1977) [18]. Поля составов базальтов: 1 – надспрединговых островов, 2 – островных дуг, 3 – срединно-океанических хребтов, 4 – океанических островов, 5 – континентальных

Figure 4. Classification diagrams for rocks of the Sylvensky complex: a – TAS-diagram; b – diagram $Al_2O_3 - K_2O + Na_2O$ (molecular amount) to distinguish ordinary subgraywackes and arkoses from intermediate and felsic magmatites; c – chondrite-normalized REE spectra for rocks of the Sylvensky complex; d – triple discrimination diagram for volcanics using K_2O , SiO_2 , MgO [17]. Volcanic composition fields: CR – continental rifts, CCZ – continental collision zones, MORB – mid-ocean ridges, SSZ – subduction zones; e – triple discrimination diagram for rocks of basaltic and andesitic composition $MgO - FeO - Al_2O_3$ [18]. Basalt composition fields: 1 – supra-spreading islands, 2 – island arcs, 3 – mid-ocean ridges, 4 – oceanic islands, 5 – continental

%), Mg-Fe слюды флогопита (10 %), мусковита (5–7 %), а также изотропным каплевидной и эллипсоидальной формы вулканическим стеклом (10–20 %). В шлифах встречаются округлые (оплавленные по краям?) сферические стеклофазы кварца и алюмосиликатов размером 0,1–0,2 до 0,4 мм. Основная масса – цемент (10–15 %) от контурного, смешанного до закрытого порового типа кварц-полевошпат-глинистого состава. Часто наблюдается распад и дробление обломков и зерен с проникновением в них цемента. Химический состав последнего (табл. 1) характери-

зуется повышенными концентрациями кремнезема, глинозема и щелочей. Рентгеновская диагностика (фазовый анализ) тонкой фракции основной массы свидетельствует о присутствии в пробе кварца, кислого плагиоклаза с примесью калиевого полевого шпата, либо лейцита, анальцима, а также значительного количества монтмориллонита. Подобная характеристика позволяет более-менее достоверно идентифицировать породу с учетом обломочной (брекчиевой) текстуры как брекчию флюидолитов, аналогичную во многом породам Вишерского района (табл. 1).

Анализ содержаний редкоземельных элементов (РЗЭ) в пирокластическом цементе и породе в целом свидетельствует о преобладании легких лантаноидов над тяжелыми при общем содержании РЗЭ 51,6–85,7 г/т (рис. 4). При этом концентрации РЗЭ в целом соответствуют составам кимберлитов-лампроитов при некотором возрастании тяжелых лантаноидов [6]. Изучение проб-протолок показало наличие в них следующих акцессорных минералов: магнетита, апатита, титанита, лейкоксена, циркона, эпидота, пирита, рутила, гематита. В единичных пробах встречаются золото, молибденит, ильменит, монацит, алмаз, корунд, вулканическое стекло, серпентин, муассанит, магнитные и стеклянные сферулы, хромшпинелиды. Определение акцессорных минералов из протолок было произведено оптическими методами, а монокристалл алмаза диагностирован с привлечением рентгеноструктурного анализа. Для последнего был рассчитан дифракционный спектр, в котором присутствуют следующие $K\alpha$ -линии: 2,05 (10)–1,263 (7)–1,077 (10), что однозначно идентифицирует его как алмаз [16].

По своим петрографическим и петрохимическим параметрам породы комплекса относятся к умеренно щелочным вулканическим породам, близким к анальцимовым шошонитам либо санидиновым анальцимитам, свойственным областям эпиплатформенных рифтов, проявившимся на Урале в раннем мезозое. Триас-юрский возраст принят на основании внедрения флюидолитов в нижнепермские отложения с учетом находок анальцимсодержащей пирокластике в верхней перми и корреляции с мезозойским рифтогенезом Урало-Сибирского сегмента Евразии [15] и проявлением Сибирского суперплюма.

Выводы

Впервые в пределах восточной Юрюзано-Сылвенской депрессии Предуральского прогиба в зоне влияния Главного

Западно-Уральского надвига (ГЗУН) установлен и закартирован Сылвенский комплекс флюидогенно-эксплозивный, прорывающий терригенные породы нижней перми. Это эксплозивно-эруптивные породы, состоящие из санидина, анальцима, вулканического стекла, биотит-вермикулита, с учетом химического и минералого-геохимического составов принадлежат к семейству трахиандезитобазальтов, конкретнее – к анальцимовым шошонитам (санидиновым анальцимитам). Они характеризуются повышенными концентрациями Li, Be, Sc, As, U, Ag, Ce, содержат алмаз, хромшпинелиды, золото, магнетит, апатит, рутил, монацит, циркон, магнитные и стеклянные сферулы. Последние совместно с каплевидными и эллипсообразными выделениями вулканического стекла можно рассматривать, судя по публикациям [19], в качестве индикаторов флюидно-магматического процесса при проявлении фреатического вулканизма на изучаемой территории [20]. На основании имеющихся материалов данный комплекс брекчированных флюидолитов имеет, по-видимому, весьма широкое распространение и полифазное развитие в пределах области сопряжения ГЗУН и Предуральского прогиба. Эта активная зона в раннем мезозое проявилась функционированием сосредоточенного фреатического вулканизма, доставляя к поверхности не только алмазоносные парагенезисы, но и оливин, серпентин, андалузит, ставролит, кианитовые ассоциации минералов AR-PR фундамента. Ареалы развития подобных парагенезисов совпадают с геохимическими аномалиями Li, Ce, Ag, проявлениями нефтегазовых объектов и минерализованных источников напорных вод, зон дезинтеграции и флюидизации, выявленных геофизическими методами [21], а также районов распространения глыбовых конглобрекций. Становление комплекса происходило при окраинно-континентальном рифтогенезе, по-видимому, в мезозойский эмерсивный триас-юрский этап развития территории.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ваганов В. И. Алмазные месторождения России и мира (основы прогнозирования). М.: Геоинформмарк, 2000. 371 с.
2. Ветчанинов В. А. К вопросу об источниках алмазов уральских россыпей // Геология и геофизика. 1980. № 9. С. 164–168.
3. Рапопорт М. С., Кузовков Г. Н. Ожидаемые типы коренной алмазоносности Урала // Известия УГГА. 2000. Вып. 10. С. 93–99.
4. Остроумов В. Р., Морозов А. Ф., Киреев А. С., Магадеев Б. Д. Открытие коренных источников уральских алмазов (к 50-летию прииска «Уралалмаз») // Геологическое изучение и использование недр: науч.-техн. информ. сб. М.: Геоинформмарк, 1996. Вып. 6. С. 3–13.
5. Рыбальченко А. Я., Колобянин В. Я., Рыбальченко Т. М. О новом типе магматизма как возможном источнике уральских алмазов // Моделирование геологических систем и процессов: материалы регион. конф. Пермь: Изд-во Перм. ун-та, 1996. С. 111–113.
6. Лукьянова Л. И., Остроумов В. Р., Рыбальченко А. Я. Алмазоносные флюидо-эксплозивные образования Пермского Приуралья; ред. А. Ф. Морозов. М.: СПб, ГЕОКАРТ, ГЕОС, ВСЕГЕИ, 2011. 240 с.
7. Гневушев М. А., Шеманина Е. И. Некоторые особенности уральских алмазов и их возможные первоисточники // Минералы изверженных горных пород и руд Урала. Л., 1967. С. 27–40.
8. Малахов И. А. Алмазы Урала и их спутники // Известия вузов. Горный журнал. 1993. № 11. С. 57–60.
9. Чайковский И. И. Петрология и минералогия интрузивных алмазоносных пирокластитов Вишерского Урала. Пермь: Изд-во Перм. ун-та, 2001. 324 с.
10. Шурубор Ю. В. Инициативная экспертиза сообщений об открытии магматических источников алмаза на Урале // Отечественная геология. 1999. № 9. С. 42–45.
11. Ишков В. Д. Источники алмазов уральских россыпей на примере Красновишерского района // Тезисы докл. II Всесоюз. совещ. по геологии алмазных месторождений. 1966. С. 35–37.
12. Тектоническое районирование и минерагения Урала / К. К. Золоев [и др.]. М.: ГЕОС, 2006. 179 с.
13. Коротеев В. А., Нечеухин В. М., Душин В. А., Волчек Е. Н. Особенности формирования и геодинамическая карта Урало-Тимано-Палеоазиатского сегмента Евразии // Литосфера. 2020. Т. 20. № 5. С. 607–629. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2020-20-5-607-629>
14. Шарпенко Л. Н., Лукьянова Л. И., Петров О. В. Геолого-петрологическая модель формирования алмазоносных флюидоэксплозивных брекчиевых структур (уральский тип) // Литосфера. 2018. Т. 18. № 5. С. 743–757. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2018-18-5-743-757>
15. Потенциальная алмазоносность Полярного Урала / В. А. Душин [и др.]. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2014. 200 с.
16. Душин В. А., Суставов С. Г., Прокопчук Д. И., Трутнев А. К., Козьмин В. С. Первая находка алмаза из нижнепермских отложений в районе истоков р. Сылва (Свердловская область) // Региональная геология и металлогения. 2022. № 91. С. 68–78. https://doi.org/10.52349/0869-7892_2022_91_68-78
17. Демина Л. И., Симонов Д. А. Вулканыты как индикаторы процесса континентальной коллизии // Докл. АН. 1999. Т. 366. № 6. С. 793–796.
18. Pearce T. H., Gorman B. E., Birkett T. C. The Relationship between Major Element Chemistry and Tectonic Environment of Basic and Intermediate Volcanic Rocks // Earth and Planetary Science Letters. 1977. Vol. 36. Issue 1. P. 121–132. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(77\)90193-5](https://doi.org/10.1016/0012-821X(77)90193-5)
19. Рычагов С. Н., Главатских С. Ф., Сандимирова Е. И. Рудные и силикатные магнитные шарики как индикаторы структуры, флюидного режима и минералорудообразования в современной гидротермальной системе Баранского (о-в Итуруп) // Геология рудных месторождений. 1996. Т. 38. № 1. С. 31–40.
20. Суставов С. Г., Душин В. А., Власов И. А., Трутнев А. К., Жуклин Е. А., Прокопчук Д. И. Металлические и стеклянные сферулы в рыхлых отложениях истоков реки Путь (Средний Урал) // Литосфера. 2021. Т. 21. № 2. С. 273–282. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2021-21-2-273-282>
21. Чурсин А. В., Ставроти В. И., Кудряшов А. М. Валообразные поднятия дорифейского фундамента Западного склона Урала, их отражение в геофизических полях и связь с алмазоносностью // Проблемы геодинамики, сейсмичности и минерагении подвижных поясов и платформенных областей литосферы: материалы Междунар. конф. Екатеринбург: УрО РАН, 1998. С. 215–217.

Статья поступила в редакцию 20 января 2023 года

Sylvensky fluidolite complex of the Yuryuzano-Sylven depression (Sverdlovsk region)

Vladimir Aleksandrovich DUSHIN*

Denis Igorevich PROKOPCHUK**

Sergey Gennad'evich SUSTAVOV***

Artem Konstantinovich TRUTNEV****

Evgeniy Aleksandrovich ZHUKLIN*****

Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia

Abstract

The object of the study. The article presents the characteristics of the first mapped diamond-bearing Sylva complex of fluidolites, established in the area of the junction of the eastern wing of the Yuryuzano-Sylva depression and the West Ural thrust zone (the sources of the Sylva River).

Materials and methods. The work is based on the results of our own research, generalization of materials on the geology and petrography of the host rock complexes, their structural and tectonic position in the zone of influence of the Main West Ural thrust. The article uses the results of studies on the VEGA LMS scanning electron microscope by TESCAN with the Xplore 30 energy dispersion prefix by Oxford Instruments and the URS-55 X-ray unit in the RCD chamber in the URSMU laboratory, as well as on the XRD-7000 diffractometer and the CPM-35 and EDX-8000 spectrometer by Shimadzu at the Geoanalyst Research Center of the Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

Results. The authors conducted a mineralogical and petrographic study of rough-clastic rocks productive for diamonds identified as fluidolites, their probable fluid-magmatic genesis is shown, which is indicated by both structural-textural and mineralogical features of volcanoclastites, including accessory minerals-indicators of diamond content, as well as the presence of teardrop-shaped, ellipsoid volcanic glass secretions, pulpy, finely dispersed nature of the bulk, unsorted, slightly rolled to sharp-angled fragments of igneous and sedimentary rocks. The chemical composition of fluidolites is shown, which determines their geodynamic affiliation and proximity to diamond-bearing tuffites of the Vishersky district. X-ray determination of both the diamond and the enclosing Sylven complex is given.

Conclusions. The data obtained indicate the probable manifestation of phreatic volcanism, which led to the transportation of diamond and its satellites by fluidolites to the weakened activated zone in front of the front of the Main West Ural thrust.

Keywords: diamond, Lower Perm, tufobreccia, fluidolites, microspherules, Yuryuzano-Sylven depression, Main West Ural thrust, Sylven complex.

REFERENCES

1. Vaganov V. I. 2000, Diamond deposits in Russia and the world (basics of forecasting). Moscow, 371 p. (In Russ.)
2. Vetchaninov V. A. 1980, On the issue of the sources of diamonds in the Ural placers, *Geologiya i geofizika* [Geology and geophysics], no. 9, pp. 164–168. (In Russ.)
3. Rapoport M. S., Kuzovkov G. N. 2000, Expected types of primary diamond content in the Urals. *Izvestiya UGGGA* [News of the Ural State Mining and Geological Academy], issue 10, pp. 93–99. (In Russ.)
4. Ostroumov V. R., Morozov A. F., Kireev A. S., Magadeev B. D. 1996, Discovery of primary sources of Ural diamonds (to the 50th anniversary of the Uralalmaz mine). Geological study and use of subsoil: scientific and technical information collection], Moscow, issue 6, pp. 3–13. (In Russ.)
5. Rybalchenko A. Ya., Kolobyanin V. Ya., Rybalchenko T. M. 1996, On a new type of magmatism as a possible source of Ural diamonds. Modeling of geological systems and processes: materials of the regional conference, Perm, pp. 111–113. (In Russ.)
6. Lukyanova L. I., Ostroumov V. R., Rybalchenko A. Ya. 2011, Diamond-bearing fluid-explosive formations of the Perm Urals; ed. A. F. Morozov. Moscow, 240 p. (In Russ.)
7. Gnevushev M. A., Shemanina E. I. 1967, Some features of the Ural diamonds and their possible primary sources. Minerals of igneous rocks and ores of the Urals. Leningrad, pp. 27–40. (In Russ.)
8. Malakhov I. A., 1993, Ural diamonds and their associates. *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal* [News of the universities. Mining journal], no. 11, pp. 57–60. (In Russ.)
9. Chaikovskiy I. I. 2001, Petrology and mineralogy of intrusive diamond-bearing pyroclastites of the Vishera Urals. Perm, 324 p. (In Russ.)
10. Shurubor Yu. V. 1999, Initiative examination of reports on the discovery of magmatic sources of diamond in the Urals. *Otechestvennaya geologiya* [Domestic geology], no. 9, pp. 42–45. (In Russ.)

✉ Vladimir.Dushin@m.ursmu.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-9657-6324>

**uva9090@mail.ru

***Sustavov.s@ursmu.ru

****tema.trutnev@yandex.ru

*****zhuklin7@gmail.com

11. Ishkov V. D. 1966, Sources of diamonds in the Ural placers using the example of the Krasnovishersky region. Abstracts of the II All-Union Conference on Geology of Diamond Deposits, pp. 35–37. (*In Russ.*)
12. Zoloev K. K. [et al.]. 2006, Tectonic zoning and minerageny of the Urals. Moscow, 179 p. (*In Russ.*)
13. Koroteev V. A., Necheukhin V. M., Dushin V. A., Volchek E. N. 2020, Formation features and a geodynamic map of the Ural-Timan-Paleo-Asian segment of Eurasia. *Litosfera* [Lithosphere], vol. 20, no. 5, pp. 607–629. (*In Russ.*) <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2020-20-5-607-629>
14. Sharpenok L. N., Lukyanova L. I., Petrov O. V. 2018, Geopetrological model of formation diamond-bearing fluid-explosive breccia structures (Urals type). *Litosfera* [Lithosphere], vol. 18, no. 5, pp. 743–757. (*In Russ.*) <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2018-18-5-743-757>
15. Dushin V. A. [et al.]. 2014, Potential diamond content of the Polar Urals. Ekaterinburg, 200 p. (*In Russ.*)
16. Dushin V. A., Sustavov S. G., Prokopchuk D. I., Trutnev A. K., Kozmin V. S. 2022, First discovery of a diamond from lower Permian deposits in the area of the Sylva river headwaters (Sverdlovsk region). *Regional'naya geologiya i metallogeniya* [Regional geology and metallogeny], no. 91, pp. 68–78. (*In Russ.*) https://doi.org/10.52349/0869-7892_2022_91_68-78
17. Demina, L. I., Simonov, D. A. 1999, Volcanites as indicators of the process of continental collision. *Dokl. AN*. [Reports of the Academy of Sciences], vol. 366, no. 6, pp. 793–796. (*In Russ.*)
18. Pearce T. H., Gorman B. E., Birkett T. C. 1977, The Relationship between Major Element Chemistry and Tectonic Environment of Basic and Intermediate Volcanic Rocks. *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 36, issue 1, pp. 121–132. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(77\)90193-5](https://doi.org/10.1016/0012-821X(77)90193-5)
19. Rychagov S. N., Glavatskikh S. F., Sandimirova E. I. 1996, Ore and silicate magnetic balls as indicators of structure, fluid regime and mineral ore formation in the modern hydrothermal system of Baransky (Iturup Island). *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy* [Geology of Ore Deposits], vol. 38, no. 1, pp. 31–40. (*In Russ.*)
20. Sustavov S. G., Dushin V. A., Vlasov I. A., Trutnev A. K., Zhuklin E. A., Prokopchuk D. I. 2021, Metallic and glass spherules in the loose deposits of the Put river head (Middle Urals). *Litosfera* [Lithosphere], vol. 21, no. 2, pp. 273–282. (*In Russ.*) <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2021-21-2-273-282>
21. Chursin A. V., Stavrotti V. I., Kudryashov A. M. 1998, Shaft-like uplifts of the pre-Riphean basement of the Western slope of the Urals, their reflection in geophysical fields and connection with diamond content. Problems of geodynamics, seismicity and mineralization of mobile belts and platform areas of the lithosphere: materials of the International conference, Ekaterinburg, pp. 215–217. (*In Russ.*)

The article was received on January 20, 2023

Методика оценки напряженного состояния горного массива многокомпонентным датчиком смещений методом overcoring

Никита Андреевич БЕЛЯКОВ*
Иван Андреевич ЕМЕЛЬЯНОВ**

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация

Актуальность. В настоящее время горнодобывающая промышленность находится в начале нового этапа развития, которому соответствует добыча полезных ископаемых на больших глубинах в осложненных условиях. Исходя из этого формируется неопределенность в оценке параметров напряженного состояния горного массива, в котором ведутся горные работы, что способствует росту чрезвычайных ситуаций в подземных условиях. Метод кольцевой разгрузки (overcoring) способен дать количественную и качественную информацию о напряженном состоянии.

Цель работы – обоснование методики оценки напряженного состояния горного массива методом кольцевой разгрузки (overcoring), включающей в себя два основных этапа: 1 – полевые испытания; 2 – обработка данных полевых испытаний.

Методы исследования. Метод кольцевой разгрузки (overcoring) основан на измерении перемещений точек стенок измерительной скважины многокомпонентным датчиком смещений в результате создания кольцевой щели (формирование полной разгрузки). Обработка данных производится двумя основными подходами: 1 – численное моделирование; 2 – аналитический расчет.

Результаты исследования. Описана концепция проведения работ по оценке напряженного состояния горного массива методом кольцевой разгрузки (overcoring). Представлена подробная информация о проведении полевых испытаний, а именно о последовательности измерений и необходимого оборудования. Создан пошаговый алгоритм обработки данных, полученных в результате проведения полевых испытаний, основанный на численном моделировании и аналитическом анализе.

Выводы. Представленная в настоящей работе методика была опробована на месторождениях компаний АО «Апатит» и ПАО «Норильский никель» и показала корректные количественные и качественные результаты по оценке напряженного состояния горного массива.

Ключевые слова: напряженное состояние горного массива, кольцевая разгрузка, многокомпонентный датчик смещений, численное моделирование, аналитический расчет.

Введение


Разработка рудных месторождений – это основа экономического развития минерально-сырьевого комплекса Российской Федерации. Добыча полезных ископаемых связана с ведением работ в условиях повышенной опасности. Степень опасности в основном зависит от сложности и неопределенности горно-геологических условий, в которых выполняются работы. Так, различного рода нарушения горного массива (трещиноватость, блочность, слоистость), обводненные и ослабленные породы оказывают негативное влияние на операции, проводимые на каждом этапе строительства и эксплуатации горного предприятия [1]. Помимо этого, существует ряд не менее важных, решенных не в полной степени задач, связанных с оценкой напряженного состояния горного массива, в котором ведутся работы по добыче полезного ископаемого. Для того чтобы решить эти задачи, необходимо проводить специальные мероприятия по определению напряженного состояния горного массива [2–4].

Горный массив рассматривается как сплошная однородная среда в пределах некоторого объема (одна высотная отметка в масштабе рудного месторождения) с совокупностью точек внутри него. Определимся с понятием напряженного состояния в точке горного массива. Напряженное состояние – это тензорная величина. На рис. 1 показаны ориентации нормальных, касательных и главных напряжений (направления главных осей приняты произвольно). Считается, что для напряженного состояния выполняется закон парности касательных напряжений ($\tau_{xy} = \tau_{yx}$, $\tau_{xz} = \tau_{zx}$, $\tau_{yz} = \tau_{zy}$), согласно которому необходимо знать шесть независимых компонент – три нормальных напряжения и три касательных, чтобы определить напряженное состояние в любой точке горного массива. Также важной задачей является определение ориентации главной системы координат по отношению к системе, в которой выполнено измерение компонент напряженного состояния [5–7].

✉ Belyakov_NA@pers.spmi.ru

 <http://orcid.org/0000-0002-9754-501X>

**s215065@stud.spmi.ru

 <http://orcid.org/0000-0002-8512-3629>

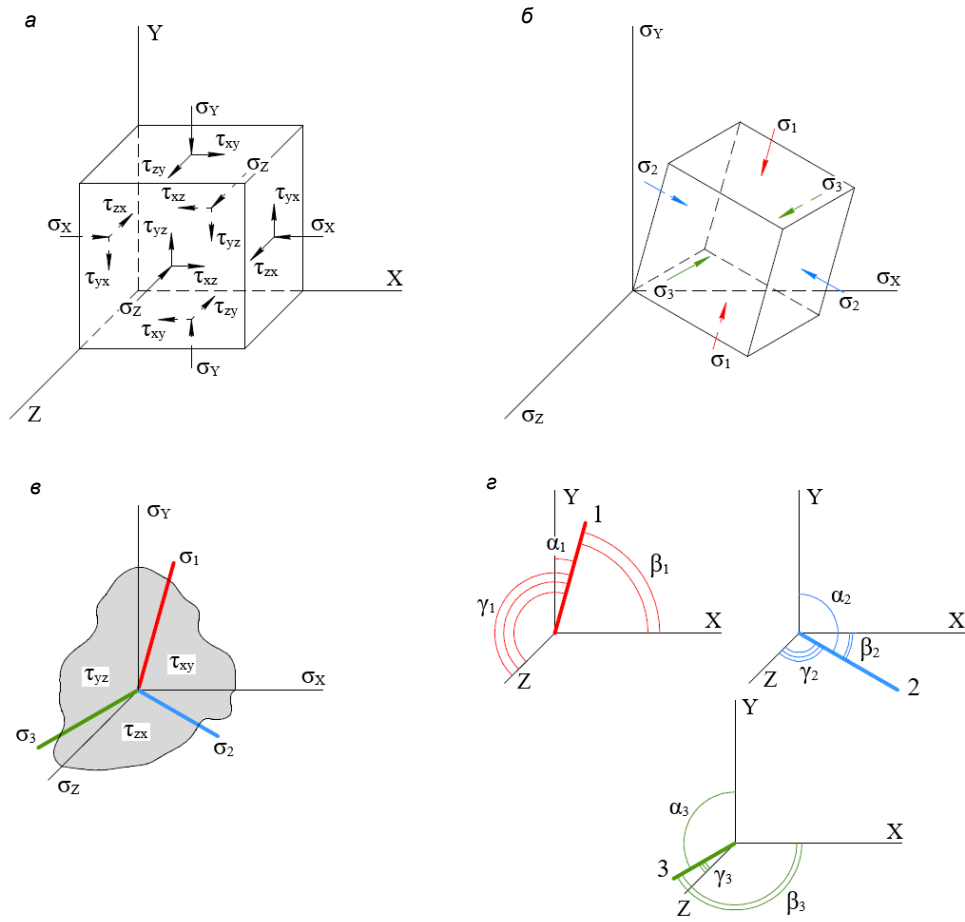


Рисунок 1. Ориентация нормальных, касательных и главных напряжений: а – напряженное состояние в произвольной декартовой системе координат; б – напряженное состояние в главной системе координат; в – ориентация главных напряжений относительно напряжений в произвольной системе координат; г – направляющие косинусы главных осей
Figure 1. Orientation of normal, shear and principal stresses: a – stress state in an arbitrary Cartesian coordinate system; b – stress state in the main coordinate system; c – orientation of principal stresses relative to stresses in an arbitrary coordinate system; d – direction cosines of the principal axes



Рисунок 2. Геомеханические методы оценки напряженного состояния
Figure 2. Geomechanical methods for assessing the stress state

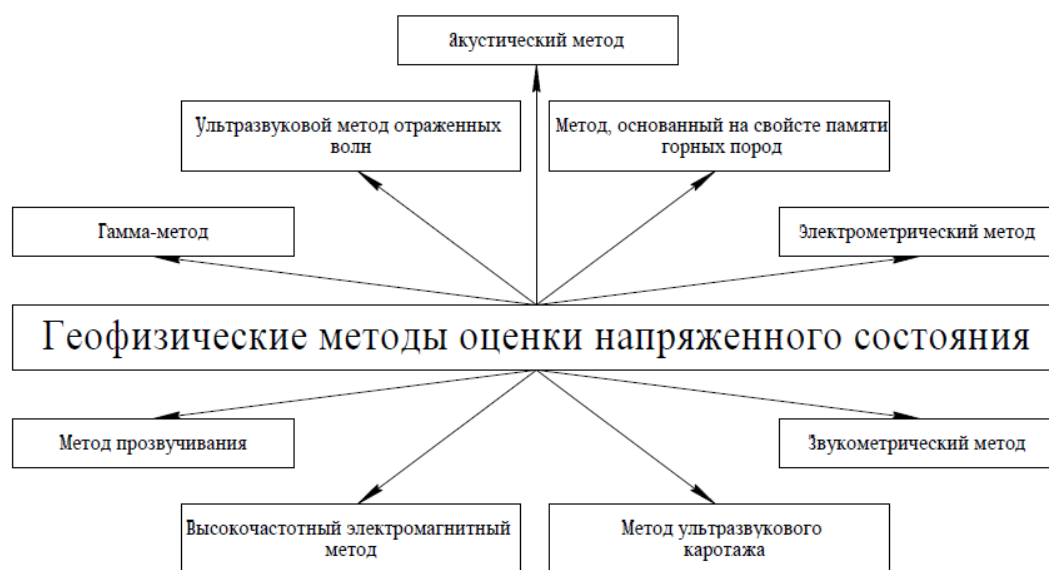


Рисунок 3. Геофизические методы оценки напряженного состояния
Figure 3. Geophysical methods for assessing the stress state

Для решения поставленных задач существуют как уже действующие методы, так и разрабатываются новые. На данный момент можно выделить три основные группы методов оценки напряженного состояния горного массива: геомеханические, геологические и геофизические.

Геомеханические методы оценки напряженного состояния горного массива включают в себя методы (рис. 2), основанные на определении степени деформирования горного массива в месте проведения измерений. Данная группа методов является высокоточной, однако существует ряд сложностей, связанных с высокой трудоемкостью при проведении работ, а также требуются дополнительные лабораторные испытания по определению деформационных свойств горных пород в замерных точках [8–10].

Геофизические методы – методы (рис. 3), определяющие взаимосвязь между искусственными и естественными физическими полями и напряжениями, действующими в горном массиве. Данная группа методов позволяет оценить изменение напряженного состояния в заданном временном промежутке [11, 12].

Основой геологических методов оценки напряженного состояния горного массива является анализ общей геологической обстановки исследуемого участка горной выработки (рис. 4). Согласно этому, методы, входящие в группу, способны предоставить лишь упрощенную качественную оценку и не способны дать точные количественные данные о напряженном состоянии горного массива [13, 14].

В настоящее время методы, представленные ранее, нашли широкое применение в различных прикладных исследованиях, связанных с оценкой напряженного состояния. Однако существует ряд нерешенных задач, которые не позволяют использовать некоторые методы для того, чтобы корректно определить естественное напряженное состояние горного массива. Группы геологических и геофизических методов являются вспомогательными, так как не способны предоставить точную количественную оценку в отличие от геомеханических методов.

В настоящей работе подробно рассмотрен один из наиболее распространенных геомеханических методов полной разгрузки – метод кольцевой разгрузки (overcoring) ввиду того, что он имеет высокую точность измерений и способен предоставить как качественную, так и количественную оценку естественного напряженного состояния горного массива [15].

Описание метода кольцевой разгрузки и основных этапов работ при его выполнении. Метод кольцевой разгрузки относится к группе методов, связанных с проведением буровых работ для создания измерительной (пилотной) скважины. Сущность метода кольцевой разгрузки заключается в измерении перемещения точек стенок пилотной скважины, где установлен многокомпонентный датчик смещений, в результате ее обуривания. Таким образом оценивается упругое восстановление элемента горного массива в процессе обуривания измерительной скважины, т. е. в процессе создания искусственного нарушения его связи вмещающим массивом.

Измерение перемещения точек стенок пилотной скважины выполняются с использованием многокомпонентного датчика смещений, схема которого представлена на рис. 5. Высокочувствительные элементы, установленные на датчике, позволяют получить значения в девяти различных направлениях. Важно отметить, что перед выполнением измерений датчик должен быть полностью проверен на предмет неисправностей и откалиброван.

Порядок проведения работ по оценке напряженного состояния горного массива методом кольцевой разгрузки (рис. 6):

1. Перед началом выполнения полевых работ необходимо выбрать место измерений, обращая особое внимание на нарушенность горного массива (трещиноватость, блочность, слоистость); данный этап является одним из наиболее важных, так как если место будущих измерений будет определено неверно, то это может повлечь за собой как получение недостоверных результатов, так и невозможность выполнения работ; однако полевые работы мо-

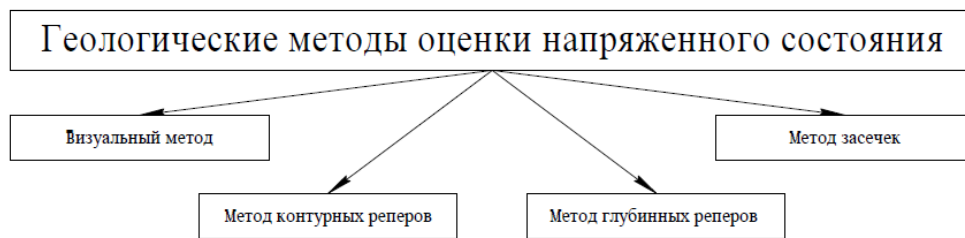


Рисунок 4. Геологические методы оценки напряженного состояния
Figure 4. Geological methods for assessing the stress state

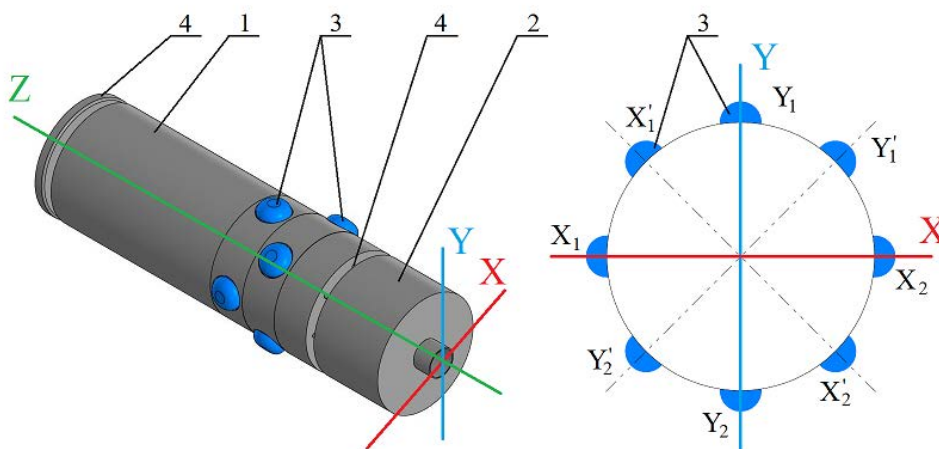


Рисунок 5. Схема многокомпонентного датчика смещений: 1 – корпус; 2 – блок хранения данных; 3 – высокочувствительные измерительные элементы (инденторы); 4 – элементы крепления и фиксации датчика
Figure 5. Scheme of a multicomponent displacement sensor: 1 – body; 2 – data storage block; 3 – highly sensitive measuring elements (indenter); 4 – elements of fastening and fixing the sensor

гут быть выполнены в нарушенном горном массиве при условии, что это будет отражено в журнале выполнения работ и учтено в процессе моделирования на этапе обработки полученных данных с места замера;

2. После определения места проведения устанавливается буровое оборудование;

3. Бурение пилотной (измерительной) скважины; размеры и протяженность скважины обусловлены измерительным и буровым оборудованием; в процессе бурения и извлечения керна из скважины необходимо внимательно следить за его состоянием; если вынимаемый из скважины керн не имеет видимых повреждений, то можно выполнять измерения на данной глубине; если вынимаемый керн «выходит» кольцами – высоконапряженный горный массив, необходимо увеличить глубину измерения;

4. Установка многокомпонентного датчика смещений; после того как измерительная скважина пробурена на проектное расстояние, начинаются работы по установке заранее подготовленного многокомпонентного датчика смещений. В момент установки датчик подключен к компьютерной программе, в которой отображены его основные параметры (номер, вводная информация, заряд, время, расположение чувствительных элементов относительно оси Z (рис. 5)); с использованием программы необходимо выполнить позиционирование датчика, после чего он отключается от программы;

5. Обуривание измерительной скважины; для того чтобы создать зону разгрузки горного массива, вокруг

измерительной скважины формируется кольцевая щель; в момент обуривания (формирование полной разгрузки) датчик записывает показания перемещений точек стенок измерительной скважины;

6. Извлечение многокомпонентного датчика смещений; после обуривания измерительной скважины датчик снова подключается к программе, выполняется первичный анализ полученных данных и датчик извлекается;

7. Выполняются измерения на следующем интервале либо на следующей точке.

В настоящей работе описана методика выполнения полевых работ по оценке напряженного состояния горного массива с применением определенного измерительного и бурового оборудования. Это обуславливает следующие параметры пилотной скважины и кольцевой щели:

- диаметр пилотной скважины: 82 мм;
- наружный диаметр кольцевой щели: 132 мм;
- толщина кольцевой щели: 4 мм.

Также необходимо отметить два важных примечания. Первое – измерения производятся на различных интервалах (глубинах). Это необходимо для определения зоны влияния горной выработки. Второе – в процессе обуривания пилотной скважины происходит повышение температуры, которое оказывает влияние на измеряемые датчиком перемещения точек стенок пилотной скважины. Для того чтобы свести температурное влияние к минимуму, производится охлаждение пилотной скважины водой.

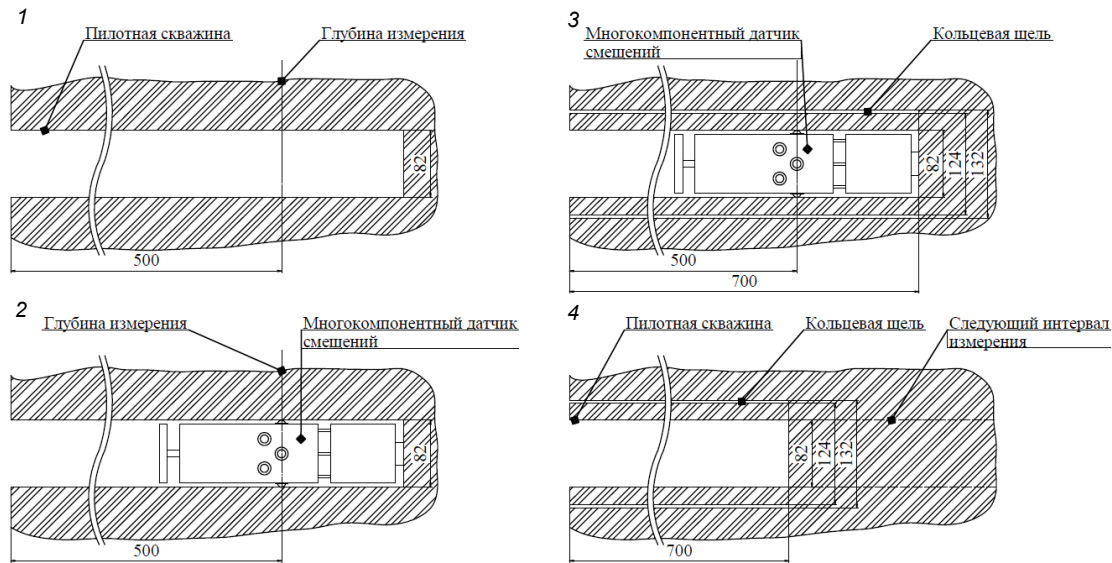


Рисунок 6. Порядок проведения работ по оценке естественного напряженного состояния горного массива методом кольцевой разгрузки: 1 – бурение пилотной (измерительной) скважины; 2 – установка многокомпонентного датчика; 3 – обуривание измерительной скважины; 4 – извлечение датчика и начало проведения работ на следующем интервале

Figure 6. The procedure for assessing the natural stress state of the rock mass using the overcoring method: 1 – drilling a pilot (measuring) well; 2 – installation of a multicomponent sensor; 3 – drilling around a measuring well; 4 – removal of the sensor and the start of work at the next interval

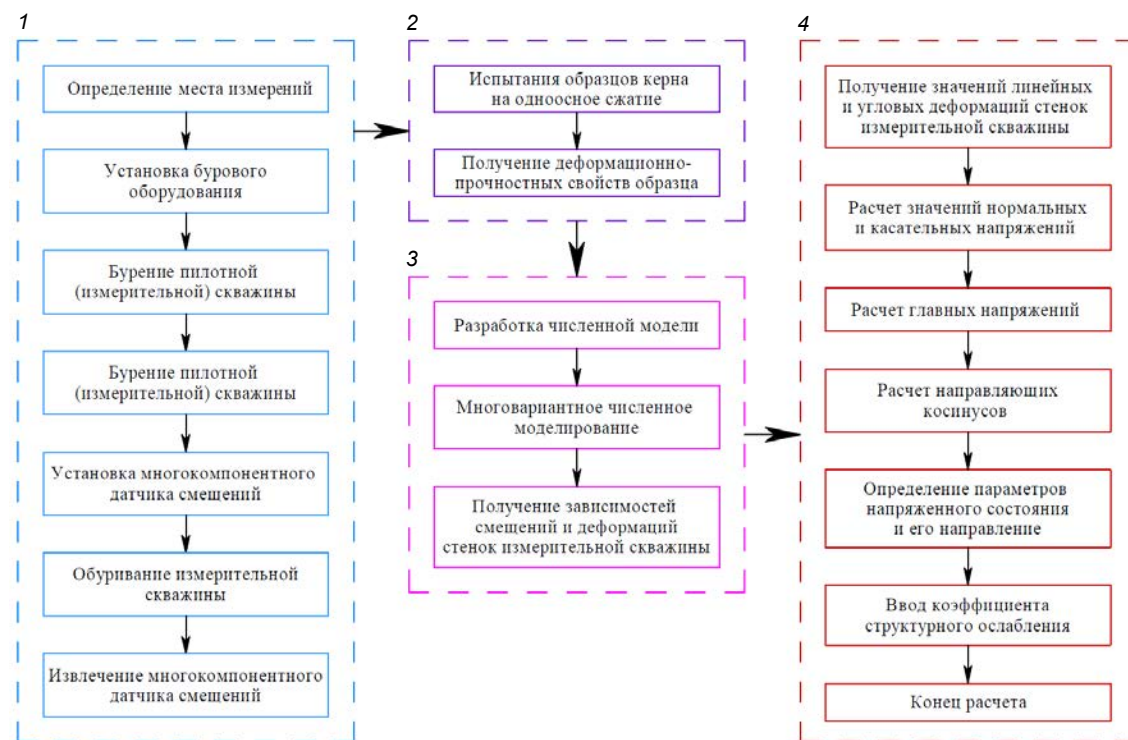


Рисунок 7. Этапы ведения работ по оценке напряженного состояния горного массива: 1 – полевые работы; 2 – лабораторные испытания; 3 – численное моделирование; 4 – аналитический расчет

Figure 7. Stages of work on the assessment of the stress state of the rock mass: 1 – field work; 2 – laboratory tests; 3 – numerical modelling; 4 – analytical calculation

Измерения, описанные ранее, проводятся в условиях повышенной опасности, так как все работы выполняются в подземных условиях. Согласно этому, все участники данного процесса должны иметь соответствующую квалификацию. Помимо этого, со стороны горного предприятия, на территории которого ведутся работы, должен присутствовать сопровождающий. Это необходимо для

предотвращения непредвиденных экстренных ситуаций, а также для совместного решения задач, возникающих в процессе выполнения полевых работ.

После выполнения запланированных полевых работ образцы керна (цилиндрическая форма), полученные в результате полевых замеров, направляются в лабораторию для проведения различных испытаний, основная

цель которых – получение деформационно-прочностных свойств. Далее производится обработка данных, полученных в результате проведения полевых работ, а именно – величин перемещений точек стенок измерительной скважины в процессе ее разгрузки.

Методика обработки данных полевых работ. Основная задача, которую необходимо решить в процессе обработки данных, – это подбор параметров напряженного состояния горного массива, которые соответствуют значениям смещений, замеренных в процессе проведения полевых работ (создание полной разгрузки части горного массива методом кольцевой разгрузки). После решения данной задачи можно сделать вывод о том, что подобранные параметры напряженного состояния горного массива соответствуют исходному, сформировавшемуся в горном массиве до начала горнопроходческих работ.

Данная методика включает в себя два основных подхода: 1 – численное моделирование; 2 – аналитический расчет [16, 17]. Основные этапы ведения работ по оценке напряженного состояния горного массива представлены в виде блок-схемы на рис. 7.

После получения исходных данных (деформационно-прочностные свойства пород и положение места измерения) разрабатывается численная конечно-элементная модель, в которой учитываются геометрия горной выработки и этапы проведения полевых замеров. Результатом многовариантного численного моделирования являются зависимости смещений и деформаций стенок измерительной скважины.

Далее на основе аналитического подхода выполняется расчет нормальных и касательных напряжений, исходя из чего определяются главные напряжения и их ориентация.

На данном этапе важно отметить, что предоставленные в качестве исходных данных деформационно-прочностные свойства, полученные в результате проведения лабораторных испытаний керна, не соответствуют свойствам горного массива. Проблема перехода от свойств образца к свойствам горного массива относительно размеров пилотной скважины и горной выработки (масштабный эффект) [18] в настоящий момент времени решена не в полной мере. Поэтому в процессе обработки данных, полученных в ходе выполнения полевых работ, необходимо вводить поправочные коэффициенты структурного ослабления на деформационные и прочностные свойства, для получения корректных данных.

Заключение

В настоящей работе представлена методика по оценке напряженного состояния горного массива методом кольцевой разгрузки (overcoring), включающая в себя полевые работы и обработку полученных данных. Выполнение полевых работ подразумевает в себе измерение перемещений точек стенок пилотной скважины в результате создания вокруг нее зоны разгрузки горного массива. В предложенную концепцию по обработке данных входят три основные составляющие: лабораторные испытания образцов керна, численное моделирование и аналитический расчет.

Необходимо отметить, что описанная методика была опробована на месторождениях компаний АО «Апатит» и ПАО «Норильский никель» и показала корректные результаты.

В дальнейших исследованиях будет более подробно описана методика обработки данных полевых работ, а также даны рекомендации по введению поправочных коэффициентов структурного ослабления на деформационные и прочностные свойства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сашурин А. Д., Панжин А. А. Современные проблемы и задачи геомеханики // ГИАБ. 2020. № 3-1. С. 188–198. <http://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-31-0-188-198>
2. Zubkov A. V., Sentyabov S. V., Selin K. V. A technique for determination of natural stresses in rock masses by surface deformation using satellite navigation systems // Lithosphere. 2019. Vol. 19. No. 5. P. 767–779. <http://doi.org/10.24930/1681-9004-2019-19-5-767-779>
3. Протосеня А. Г. Моделирование геомеханических процессов в рудном массиве с использованием модели физически нелинейного тела // Записки Горного института. 2015. Т. 214. С. 13–22.
4. Mazurov B. T., Mustafin M. G., Panzhin A. A. Estimation method for vector field divergence of earth crust deformations in the process of mineral deposits development // Journal of Mining Institute. 2019. Vol. 238. P. 376–382. <http://doi.org/10.31897/PMI.2019.4.376>
5. Abirov R., Adilov F., Khodzhaev D., Ishmatov A., Zokirov I. On one approach in underground mining modeling // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 883. No. 1. P. 1–7. <http://doi.org/10.1088/1757-899X/883/1/012210>
6. Протосеня А. Г., Катеров А. М. Развитие напряженно-деформированного состояния комбинированной крепи вертикального ствола, пройденного в соляном массиве // ГИАБ. 2022. № 6-1. С. 100–113. http://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_61_0_100
7. Hudson J. A., Cornet F. H., Christiansson R. ISRM suggested methods for rock stress estimation – Part 1: Strategy for rock stress estimation // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2003. Vol. 40. Issues 7–8. P. 991–998. <http://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2003.07.011>
8. Fairhurst C. Stress estimation in rock: a brief history and review // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2003. Vol. 40. Issues 7–8. P. 957–973. <http://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2003.07.002>
9. Scelsi G., De Bellis M. L., Pandolfi A., Musso G., Della Vecchia G. A step-by-step analytical procedure to estimate the in-situ stress state from borehole data // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2019. Vol. 176. P. 994–1007. <http://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.01.100>
10. Seryakov V. M. Stress Determination in Rock Mass with Regard to Sequence of Deep-Level Cut-and-Fill // Journal of Mining Science. 2021. Vol. 57. No. 6. P. 894–900. <http://doi.org/10.1134/S1062739121060028>
11. Pudov E., Kuzin E., Efremenkov A. Estimation of impact of rock conditions on the conveyor workings geometry by means of geophysical methods // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 939. No. 1. P. 1–9. <http://doi.org/10.1088/1757-899X/939/1/012063>
12. Баженова Е. А. Выделение тектонически нарушенных зон в пределах рудного месторождения по комплексу геофизических методов // ГИАБ. 2022. № 5. С. 67–83. http://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_5_0_67
13. Баделло В. А., Бейдин А. В., Овсейчук В. А., Смолич С. В. Оценка состояния горного массива на основе анализа горно-геологической обстановки и моделирования его напряженности // ГИАБ. 2019. № 12. С. 41–54. <http://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-12-0-41-54>
14. Сосновская Е. Л., Авдеев А. Н. Прогноз устойчивости массива горных пород на основе анализа кернового материала разведочных скважин // ГИАБ. 2020. № 3-1. С. 216–223. <http://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-31-0-216-223>
15. Sjöberg J., Christiansson R., Hudson J. A. ISRM suggested methods for rock stress estimation – Part 2: Overcoring methods // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2003. Vol. 40. Issues 7–8. P. 999–1010. <http://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2003.07.012>
16. Liu J., Ding W., Yang H., Wang R., Yin S., Li A., Fu F. 3D geomechanical modeling and numerical simulation of in-situ stress fields in shale reservoirs: A case study of the lower Cambrian Niutitang formation in the Cen'gong block, South China // Tectonophysics. 2017. Vol. 712–713. P. 663–683. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2017.06.030>
17. Rálek P., Sosna K., Hokr M., Franěk J. In situ measurements of thermally loaded rock and evaluation of an experiment with a 3D numerical model // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2018. Vol. 105. P. 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2018.01.042>
18. Протосеня А. Г., Верблин П. Э. Определение масштабного эффекта прочностных свойств трещиноватого горного массива // Известия ТулГУ. Науки о Земле. 2016. № 1. С. 167–176.

Статья поступила в редакцию 17 ноября 2022 года

Technique for assessing the stress state of a rock mass by a multicomponent displacement sensor using the overcoring method

Nikita Andreevich BELYAKOV*
Ivan Andreevich EMEL'YANOV**

Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

Abstract

Relevance. Currently, the mining industry is at the beginning of a new stage of development, which corresponds to the extraction of minerals at great depths in difficult conditions. Based on this, an uncertainty is formed in the assessment of the parameters of the stress state of the rock mass in which mining operations are carried out, which contributes to the growth of emergency situations in underground conditions. The method of overcoring is able to provide quantitative and qualitative information about the stress state.

The purpose of the research – substantiation of the methodology for assessing the stress state of the rock mass by the method of overcoring, which includes two main stages: 1 – field tests; 2 – processing of field test data.

Research methodology. The method of overcoring is based on measuring the displacements of the points of the walls of the measuring well with a multicomponent displacement sensor as a result of creating an annular gap (formation of complete unloading). Data processing is carried out by two main approaches: 1 – numerical modelling; 2 – analytical calculation.

Results. The concept of carrying out work on the assessment of the stress state of the rock mass by the method of overcoring is described. Detailed information about the field test is provided, namely the sequence of measurements and the necessary equipment. A step-by-step algorithm for processing data obtained as a result of field tests based on numerical modelling and analytical analysis has been created.

Conclusion. The technique presented in this paper was tested at the deposits of AO Apatit and PAO Norilsk Nickel and showed correct quantitative and qualitative results, according to the stress state of the rock mass.

Keywords: stressed state of a rock mass, overcoring, multicomponent displacement sensor, numerical modelling, analytical calculation.


REFERENCES

1. Sashurin A. D., Panzhin A. A. 2020, Current problems and objectives in geomechanics. *GIAB* [Mining informational and analytical bulletin (Scientific and technical journal)], no. 3-1, pp. 188–198. (*In Russ.*) <http://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-31-0-188-198>
2. Zubkov A. V., Sentyabov S. V., Selin K. V. 2019, A technique for determination of natural stresses in rock masses by surface deformation using satellite navigation systems. *Lithosphere*, vol. 19, no. 5, pp. 767–779. <http://doi.org/10.24930/1681-9004-2019-19-5-767-779>
3. Protosenya A. G. 2015, Modeling of geomechanical processes in an ore massif using a model of a physically nonlinear body. *Zapiski Gornogo instituta* [Journal of mining institute], vol. 214, pp. 13–22. (*In Russ.*)
4. Mazurov B. T., Mustafin M. G., Panzhin A. A. 2019, Estimation method for vector field divergence of earth crust deformations in the process of mineral deposits development. *Journal of Mining Institute*, vol. 238, pp. 376–382. <http://doi.org/10.31897/PMI.2019.4.376>
5. Abirov R., Adilov F., Khodzhaev D., Ishmatov A., Zokirov I. 2020, On one approach in underground mining modeling. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 883, no. 1, pp. 1–7. <http://doi.org/10.1088/1757-899X/883/1/012210>
6. Protosenya A. G., Katerov A. M. 2022, Development of stress and strain state of combined support for a vertical shaft driven in salt massif. *GIAB* [Mining informational and analytical bulletin (Scientific and technical journal)], no. 6-1, pp. 100–113. (*In Russ.*) http://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_61_0_100
7. Hudson J. A., Cornet F. H., Christiansson R. 2003, ISRM suggested methods for rock stress estimation – Part 1: Strategy for rock stress estimation. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 40, issues 7–8, pp. 991–998. <http://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2003.07.011>
8. Fairhurst C. 2003, Stress estimation in rock: a brief history and review. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 40, issues 7–8, pp. 957–973. <http://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2003.07.002>
9. Scelsi G., De Bellis M. L., Pandolfi A., Musso G., Della Vecchia G. 2019, A step-by-step analytical procedure to estimate the in-situ stress state from borehole data. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, vol. 176, pp. 994–1007. <http://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.01.100>
10. Seryakov V. M. 2021, Stress Determination in Rock Mass with Regard to Sequence of Deep-Level Cut-and-Fill. *Journal of Mining Science*, vol. 57, no. 6, pp. 894–900. <http://doi.org/10.1134/S1062739121060028>
11. Pudov E., Kuzin E., Efremenkov A. 2020, Estimation of impact of rock conditions on the conveyor workings geometry by means of geophysical methods. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 939, no. 1, pp. 1–9. <http://doi.org/10.1088/1757-899X/939/1/012063>
12. Bazhenova E. A. 2022, Identification of fault zones within an orebody using a set of geophysical methods. *GIAB* [Mining informational and analytical bulletin (Scientific and technical journal)], no. 5, pp. 67–83. (*In Russ.*) http://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_5_0_67

✉ Belyakov_NA@pers.spmi.ru

 <http://orcid.org/0000-0002-9754-501X>

**s215065@stud.spmi.ru

 <http://orcid.org/0000-0002-8512-3629>

13. Babello V. A., Beydin A. V., Ovseychuk V. A., Smolich S. V. 2019, Assessment of rock mass behavior based on its geology analysis and stress state modeling. *GIAB* [Mining informational and analytical bulletin (Scientific and technical journal)], no. 12, pp. 41–54. (In Russ.) <http://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-12-0-41-54>
14. Sosnovskaya E. L., Avdeev A. N. 2020, Forecast of the stability of the array of gold ore deposits based on the analysis of core material from exploration core drilling wells. *GIAB* [Mining informational and analytical bulletin (Scientific and technical journal)], no. 3-1, pp. 216–223. (In Russ.) <http://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-31-0-216-223>
15. Sjöberg J., Christiansson R., Hudson J. A. 2003, ISRM suggested methods for rock stress estimation – Part 2: Overcoring methods. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 40, issues 7–8, pp. 999–1010. <http://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2003.07.012>
16. Liu J., Ding W., Yang H., Wang R., Yin S., Li A., Fu F. 2017, 3D geomechanical modeling and numerical simulation of in-situ stress fields in shale reservoirs: A case study of the lower Cambrian Niutitang formation in the Cen'gong block, South China. *Tectonophysics*, vol. 712–713, pp. 663–683. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2017.06.030>
17. Rálek P., Sosna K., Hokr M., Franěk J. 2018, In situ measurements of thermally loaded rock and evaluation of an experiment with a 3D numerical model. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 105, pp. 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2018.01.042>
18. Protosenya A. G., Verbilo P. E. 2016, Determine scale effect of strength properties in jointed rock mass. *Izvestiya TulGU. Nauki o Zemle* [News of TulGU. Earth sciences], no. 1, pp. 167–176. (In Russ.)

The article was received on November 11, 2022

Использование мелких фракций отходов каменных карьеров Азербайджана в качестве песка при приготовлении бетонов

Нияз Гадым оглы ВАЛИЕВ^{1*}
Зарифа Джахангир кызы ЭФЕНДИЕВА^{2**}
Тахим Рустам оглы ОСМАНЛЫ^{2***}

¹Уральский государственный горный университет

²Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности, Баку, Азербайджанская Республика

Аннотация

Актуальность. В последние годы предприятия стройиндустрии республики испытывают острую нужду в инертных материалах, особенно в мелком заполнителе. Имеющиеся на Апшероне месторождения песка весьма незначительны и, кроме того, в ряде случаев не соответствуют требованиям нормативных документов. Вследствие этого приходится использовать привозные пески, которые также не всегда бывают удовлетворительного качества из-за своей значительной мелкозернистости и повышенного содержания глинистых и илистых частиц. Кроме того, применение привозных песков заметно сказывается на стоимости готовых изделий. Поэтому изучение возможности применения мелких фракций отходов каменных карьеров взамен песка при приготовлении тяжелых бетонов является весьма своевременным и представляет несомненный интерес.

В статье достаточно подробно рассмотрены характеристики материалов, использованных для приготовления бетонов, исследованы основные свойства известнякового песка с различным содержанием пылевидных частиц, изучено влияние свойств известнякового песка на прочностные характеристики бетонов и их стойкость к различным температурно-влажностным воздействиям. С целью сопоставления одновременно изготовлены образцы с применением речного песка Мингечаурского месторождения. Полученные результаты показывают, что в бетонах на гравии и щебне при применении известнякового песка, по сравнению с бетонами на природном песке, несколько увеличивается расход цемента на 1 м³ бетона.

Цель работы. В статье рассмотрена проблема использования мелких фракций отходов каменных карьеров в качестве песка при приготовлении бетонов.

Методы исследования. Для определения приращения объема при набухании использована простая методика. Исследованы физико-механические испытания песка, показаны изучение модуля крупности при перемешивании с гравием и щебнем и способность приращения объема при набухании.

Результаты. Использование дешевых местных отходов ракушечных известняков в качестве мелких и крупных заполнителей бетона позволит несколько покрыть потребность стройиндустрии республики в заполнителях, особенно в мелких заполнителях.

Выводы. Известняковые пески, получаемые при распиловке ракушечных известняков Апшеронского полуострова, являются пригодным мелким заполнителем для приготовления бетонов.

Ключевые слова: каменный карьер, отходы, ракушечный известняк, бетон, заполнитель, известняковый песок, известняковая мелочь.

Введение

В Азербайджане широко распространены ракушечные известняки, из которых выпиливаются стеновой камень-кубик и облицовочные плиты [1–3]. В настоящее время в республике эксплуатируются многие каменные карьеры ракушечных известняков. При механизированной разработке этих месторождений наряду с основной продукцией образуются отходы в виде бута, нестандартного камня и песка (штыба). За многие годы эксплуатации каменных карьеров скопилось большое количество этих отходов, объемы которых практически не поддаются подсчету. Так, ежегодно на каменных карьерах накапливается 2 млн м³ отходов.

Как известно, в последнее время республика ощущает острую нужду в мелком заполнителе. Имеющиеся незначительные запасы мелкозернистого морского песка на Апшероне не могут обеспечить увеличивающуюся потребность в них в этом районе. Кроме того, пески многих месторождений не удовлетворяют требованиям нормативных документов. Поэтому в этом районе в основном применяются привозные пески.

Для установления возможности применения мелких отходов каменных карьеров в качестве песка в опытах использовался известняковый песок Карадагского и Гюздек-

✉science@ursmu.ru

**efendi2005@rambler.ru

***tahir.osmanli@mail.ru

Таблица 1. Физико-механические характеристики песков

Table 1. Physical and mechanical characteristics of sands

Место-рождение	Определения	Зерновой состав						Плотность, г/см ³	Объемная масса, кг/м ³	Пустотность, %	Содержание пылеватых и глинистых частиц, %	Модуль крупности M_k	Содержание органических примесей
		Размеры сит, мм											
		2,5	1,25	0,63	0,31	0,14	Менее 0,14						
Карадагское	Частный остаток, г	85,0	25,0	130,0	355,0	265,0	140,0						
	Частный остаток, %	8,5	2,5	13,0	35,5	26,5	14,0	2,50	1400	44	–	1,9	Нет
	Полный остаток, %	8,5	11,0	24,0	59,5	86,0	–						
Гюздекское	Частный остаток, г	120,0	35,0	140,0	290,0	260,0	155,0						
	Частный остаток, %	12,0	3,5	14,0	29,0	26,0	15,5	2,40	1350	44	–	2,0	Нет
	Полный остаток, %	12,0	15,5	29,5	58,5	84,5	–						
Мингечаурское	Частный остаток, г	120,0	25,0	68,0	405,0	318,0	65,0	1,00					
	Частный остаток, %	12,0	2,5	6,8	40,5	31,8	6,5	2,60	1480	43	4,0	2,0	Нет
	Полный остаток, %	12,0	14,5	21,8	61,8	93,5	–						

Таблица 2. Изменения модуля крупности песков при перемешивании

Table 2. Changes in the modulus of sand size during mixing

Состав смеси	M_k до перемешивания	M_k после перемешивания	
		3 мин	5 мин
Песок мингечаурский, гравий	1,98	2,00	2,00
Песок известняковый, гравий	1,82	1,67	1,60
Песок мингечаурский, щебень	1,98	1,95	2,00
Песок мингечаурский, гравий	2,58	2,52	2,60
Песок известняковый, гравий	2,75	2,40	2,20
Песок мингечаурский, щебень	2,58	2,50	2,52
Песок известняковый, щебень	2,75	2,30	2,35

ского месторождений. Для сравнения применялся также природный речной песок Мингечаурского месторождения.

Физико-механические характеристики песков приводятся в табл. 1. Как видно из этих данных, испытанные пески удовлетворяют требованиям ГОСТ 22263–76 и 9736–77 и относятся к средним и мелким пескам. При этом исключение составляет содержание в природном мингечаурском песке

глинистых, илистых и пылевидных частиц, которые не должны превышать 3 % по весу, а также предел прочности исходной породы, которая должна иметь прочность при сжатии не ниже 40 МПа, а при согласии сторон не менее 20 МПа.

Известно, что прочность песка из известняка-ракушечника значительно ниже прочности обычного плотного природного песка [4–6]. Поэтому при перемешивании в бетономешалке совместно с гравием или щебнем возможно изменение его зернового состава, а следовательно, и модуля крупности. Для уточнения данного вопроса проводились следующие опыты. Известняковый песок Карадагского месторождения, а для сравнения и природный песок Мингечаурского месторождения в сухом состоянии перемешивались в бетономешалке принудительного действия совместно с гравием и щебнем. Количество и соотношение мелкого и крупного заполнителя соответствовали бетону марки 200. Время перемешивания для этих определений было принято 3 и 5 мин, которые примерно соответствовали времени перемешивания бетонной смеси в мешалках.

Результаты изменений модуля крупности песков при перемешивании с гравием и щебнем приводятся в табл. 2. Из этих данных видно, что при перемешивании мингечаурского мелкого песка с гравием и щебнем его модуль крупности почти не меняется, а модуль крупности известнякового песка подвергается изменению в среднем от 1,82 до 1,60.

Пески с модулем крупности от 1,5 до 2,0 относятся к группам мелких песков [7]. Следовательно, перемешива-

ние мелкого известнякового песка изменяет его зерновой состав, но не способствует изменению его группы по модулю крупности.

Перемешивание Мингечаурского песка с модулем крупности выше 2,5 с гравием и щебнем также не приводит к изменению его модуля крупности. Однако при таком испытании крупного известнякового песка модуль крупности его резко снижается от 2,75 до 2,2–2,3, т. е. из группы крупного песка переходит в группу песка средней крупности.

Как известно, в зависимости от величины зерен глинами считают частицы размером менее 0,005 мм, более крупные частицы размером от 0,005 до 0,05 мм называют пылью, а частицы размером от 0,15 до 5 мм – песком. Обычно глинистые частицы отличаются от пылевидных тем, что при насыщении водой они сильно разбухают, а пылевидные частицы такими свойствами не обладают.

Для бетона самыми опасными являются глинистые частицы, так как при увлажнении или при насыщении водой они, увеличиваясь в объеме, создают внутренние напряжения и разрушают бетон [8–12]. Пылевидные частицы в основном приводят к увеличению расхода цемента в бетоне. Поэтому в существующих нормативных документах содержание глинистых и пылевидных частиц в мелком и крупном заполнителях строго ограничивается [13–17].

Как показали опыты, в песке, изготовленном из известняка-ракушечника, содержится значительное количество частиц размером менее 0,005 мм, однако они по химическому составу резко отличаются от глины.

Способность мельчайших частиц известняка-ракушечника, состоящих в основном из карбоната кальция, при насыщении водой разбухать или давать усадку, пока не установлена. Для уточнения этого явления пользовались существующими методами.

Известно, что пески, содержащие частицы размером менее 0,005 мм, способны к набуханию. Для определения приращения объема при набухании существует простая методика. В мерный цилиндр емкостью 25 мл при постоянном постукивании всыпают слой сухого песка объемом 10 см³. Затем песок заливают водой до уровня 23 мл.

После этого добавляют до уровня 25 мл 5 %-ный раствор хлористого кальция. Смесь взбалтывают и оставляют в покое на 3 часа, после чего определяют приращение объема песка в кубических сантиметрах или в процентах.

По указанной методике нами определялась способ-

ность приращения объема при набухании известнякового песка Карадагского и Гюздекского месторождений, а также для сопоставления – природного песка Мингечаурского месторождения. Для этого пески из указанных месторождений до испытания просеивались через сита 5 и 0,005 мм, т. е. из состава песков удалялись мельчайшие частицы, способные к набуханию. Затем к известняковым пескам вновь добавлялось требуемое количество известняковых мельчайших частиц, а к мингечаурскому песку – глина, прошедшая через сито 0,005 мм.

Эти частицы добавлялись в песок в количестве 1; 3; 5; 10 и 15 % от его веса. Результаты приращения объема песков при набухании приводятся в табл. 3.

Из этих данных видно, что с увеличением в песках количества частиц размером 0,005 мм увеличивается и приращение объема песков. При введении этих частиц в песок в количестве 1,0–15 % приращение объема известняковых песков Карадагского и Гюздекского месторождений, а также природного песка Мингечаурского месторождения составляет 10–25 %.

Нами определялось изменение объема, т. е. усадка и набухание, в зависимости от содержания в песке частиц менее 0,005 мм. Для этих целей изготавливались образцы-призмы размером 4 × 4 × 16 см из раствора состава 1 : 3 пластичной консистенции. В качестве вяжущего применялся портландцемент, а мелкого заполнителя – известняковый песок Карадагского и природный песок Мингечаурского месторождений, просеянные через сито 5 мм и оставшиеся на сите 0,14 мм. К известняковому песку добавлялась известняковая мелочь, а к мингечаурскому песку – глина (частицы менее 0,005 мм) в количестве 3; 5; 8; 10 и 15 % от веса песка. На основании проведенных исследований выявлено, что увеличение содержания частиц менее 0,005 мм до 15 % от веса песка не приводит к существенным изменениям величины усадки бетона.

Как известно, на прочность бетона существенное влияние оказывают свойства песка, особенно его зерновой состав [18–26]. Установлено, что пески, полученные дроблением известняков, более пригодны для бетона, их модуль крупности выше 2,0, а зерновой состав находится в области заштрихованной полосы, рекомендованной для песков. Пески, полученные после распиловки известняков-ракушечников на штучный камень, относительно мелкие и часто содержат больше мелких частиц (менее 0,14 мм).

Таблица 3. Приращение объема песков при набухании
Table 3. Volume increment of sands during swelling

Состав, %		Приращение объема песков					
Песок	Частицы менее 0,005 мм	Из известняка Карадагского месторождения		Из известняка Гюздекского месторождения		Песок Мингечаурского месторождения	
		см ³	%	см ³	%	см ³	%
100	–	0,50	5,0	0,50	5,0	0,25	2,5
99	1	0,50	5,0	0,50	5,0	1,00	10,0
97	3	1,75	17,5	1,50	15,0	1,50	15,0
95	5	2,00	20,0	2,00	20,0	1,50	15,0
90	10	2,50	25,0	2,50	25,0	2,50	25,0
85	15	2,50	25,0	2,50	25,0	2,50	25,0

Таблица 4. Влияние вида песка на свойства бетона на гравии
Table 4. Influence of the type of sand on the properties of concrete on gravel

Марка бетона	Фактический расход материалов на 1 м ³ бетона										Объемная масса бетона в сухом состоянии, кг/м ³	Предел прочности при сжатии, МПа		
	Цемент	Вода	Песок		Всего	Гравий		Вода/Цемент	Жесткость	Объемная масса бетона, кг/м ³		После пропарки	в 28-суточном возрасте	
			Природный мин-гечгаурский	Известняковый карадагский		Известняковый поздекский	5–10 мм, 40 %						10–20 мм, 60 %	Пропаренные образцы
100	197	187	678	–	–	1430	574	860	0,95	2500	6,8	10,6	9,8	
200	308	187	596	–	–	1420	567	851	0,61	2520	12,0	18,7	17,7	
300	405	187	537	–	–	1370	550	825	0,46	2510	17,4	29,1	27,5	
100	228	205	–	643	–	1430	573	855	0,90	2500	6,6	11,2	12,2	
200	351	200	–	522	–	1435	573	860	0,57	2520	13,5	23,5	21,5	
300	461	198	–	455	–	1385	558	836	0,42	2520	16,7	34,1	32,3	
100	230	203	–	–	653	1440	576	860	0,90	2520	8,8	13,8	12,2	
200	350	200	–	–	520	1430	571	859	0,57	2500	14,8	23,0	23,3	
300	466	200	–	–	457	1410	564	845	0,42	2550	33,4	33,4	31,6	

Таблица 5. Влияние вида песка на свойства бетона на щебне
Table 5. Influence of the type of sand on the properties of concrete on crushed stone

Марка бетона	Фактический расход материалов на 1 м ³ бетона										Объемная масса бетона, кг/м ³	Предел прочности при сжатии, МПа		
	Цемент	Вода	Песок		Всего	Гравий		Вода/Цемент	Жесткость	Объемная масса бетона, кг/м ³		После пропарки	в 28-суточном возрасте	
			Природный мин-гечгаурский	Известняковый карадагский		Известняковый гюздекский	5–10 мм, 40 %						10–20 мм, 60 %	Пропаренные образцы
100	211	199	570	–	–	1520	607	790	0,94	2500	6,6	14,4	13,0	
200	324	202	496	–	–	1505	604	901	0,62	2430	14,7	24,2	23,2	
300	433	198	438	–	–	1450	583	873	0,46	2520	25,0	36,4	32,2	
100	242	213	–	553	–	1508	603	905	0,88	2510	12,7	14,9	16,0	
200	370	210	–	456	–	1470	585	876	0,57	2500	15,0	20,6	21,4	
300	493	217	–	374	–	1450	590	884	0,42	2580	25,8	31,0	33,6	
100	242	213	–	–	552	1500	600	900	0,88	2510	13,0	15,2	15,7	
200	373	212	–	–	461	1480	590	885	0,57	2525	18,5	23,2	26,0	
300	494	212	–	–	368	1445	580	869	0,42	2540	18,7	34,2	32,0	

Влияние известнякового песка на прочность бетона нами изучалось с применением известняковых песков, изготовленных из известняка Карадагского и Гюздекского каменных карьеров. Для сравнения использовали речной песок Мингечаурского месторождения. Все эти пески имели одинаковый модуль крупности: $M_R = 2$.

Для указанных целей с применением данных песков были подобраны три марки бетона 100; 200 и 300. В качестве крупного заполнителя использовались гравий Мингечаурского месторождения и гранодиоритовый щебень Шамкирского месторождения.

Прочность образцов после пропарки составляет около 60–70 % от марочной. В 28-суточном возрасте пропаренные образцы показали несколько повышенную прочность, чем образцы, твердевшие в нормальных условиях (табл. 4, 5).

Указанные результаты показывают, что с использованием известнякового песка и обычного гравия или

щебня, удовлетворяющих требованиям соответствующих ГОСТов (исключение составляет прочность исходной породы известнякового песка), можно получать бетоны различных марок, расход цемента которых находится в пределах, допускаемых СН 386-74.

Заключение

Приведены результаты экспериментальных исследований по изучению возможности применения пористого известнякового песка взамен природного в бетонах на плотных заполнителях. Установлено влияние содержания пылевидных частиц на изменение объема известнякового песка.

С применением известнякового и плотного гравия или щебня, удовлетворяющих требованиям соответствующих ГОСТов, можно получить бетоны различных марок, расход цемента которых находится в пределах, допускаемых СН 386-74.

ЛИТЕРАТУРА

1. Геология Азербайджана. Т. VI. Полезные ископаемые. Баку: Нафта Пресс, 2003. 576 с.
2. Минерально-сырьевые ресурсы Азербайджана. Баку: Озан, 2005. 807 с.
3. Ахундов Т. Г., Самедов М. А., Фаталиев С. А. Пористые заполнители из отходов камнепиления // Строительные материалы. 1978. № 5. С. 20–22.
4. Грозав В. И., Муталибова Г. К. Снижение средней плотности бетонов на основе заполнителей из отходов камнепиления известняков-ракушечников // Природообустройство сельскохозяйственных территорий: материалы науч.-техн. конф. М: МГУП, 2001. С. 105–106.
5. Муталибова Г. К. Обоснование способов использования отходов камнепиления известняков-ракушечников для рекультивации нарушенных земель: дис. ... канд. техн. наук : 06.01.02. Дагестан, 2007. 219 с.
6. Исследование горных пород Грузии для производства легких пористых заполнителей и изделий на их основе // Сборник науч. трудов. Тбилиси, 1989. 152 с.
7. Демьянова В. С., Чумакова О. А. Использование мелких строительных песков в составе цементных композиций. Пенза: ПГУАС, 2014. 124 с.
8. Хафизова Э. Н., Ахтямов В. Ф. Исследование влияния техногенных отходов нерудного производства на свойства бетонов // Вестник ТГАСУ. 2017. № 4. С. 107–116.
9. Хафизова Э. Н., Панченко Ю. Ф., Панченко Д. А. Применение технологических отходов дробления горных пород при разработке составов цементных бетонов // Вестник СибАДИ. 2021. Т. 18. № 6(82). С. 790–799. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-790-799>
10. Искусственные пористые заполнители и легкие бетоны на их основе: справ. пособие / С. Г. Васильков [и др.]; под ред. Ю. П. Горлова. М.: Стройиздат, 1987. 304 с.
11. Ахтямов В. Ф., Хафизова Э. Н. Влияние отходов нерудного производства на свойства тяжелых бетонов // Вестник СибАДИ. 2018. Т. 15. № 2 (60). С. 261–268. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2018-2-261-268>
12. Gupta A., Gupta N., Saxena K. K., Goyal S. K. Investigation of the mechanical strength of stone dust and ceramic waste based composite // Materials Today: Proceedings. 2021. Vol. 44. Part 1. P. 29–33. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.011>
13. Cavaleri L., Borg R. P., La Mantia F. P., Liguori V. Quarry limestone dust as fine aggregate for concrete // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 442. P. 1–11. Article number 012003. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/442/1/012003>
14. Петров В. П. Пористые заполнители из отходов промышленности. Самара: СГАСУ, 2005. 152 с.
15. Использование промышленных отходов и попутных продуктов других отраслей в производстве строительных материалов и конструкций: отчет о НИР / ВНИИЭСМ; рук. Вайл. М., 1973. 109 с.
16. Потапов Ю. Б., Пузырев А. И. Цементное связующее для бетонов, наполненное отходами химической промышленности // Тезисы докладов. Пенза, 1989. 45 с.
17. Элинзон М. П. Шлаки как заполнитель для легких бетонов. М.: Госстройиздат, 1959. 196 с.
18. Коренькова С. Ф., Макридов Г. В. Применение шламовых отходов в производстве легких бетонов // Современные проблемы строительного материаловедения. Воронеж: ВГАСА, 1999. С. 210–212.
19. Кукина О. Б. Техногенные карбонаткальциевые отходы и технология их использования в строительных материалах с учетом структурообразующей роли: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05. Воронеж, 2002. 186 с.
20. Эфендиева З. Дж. Характеристика залежей и физические свойства облицовочных камней месторождений Азербайджана // Горный журнал. 2005. № 8. С. 46–47.
21. Гусев А. Д. Эффективные строительные материалы с использованием техногенных отходов: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05. Пенза, 2012. 187 с.
22. Бархатов В. И., Добровольский И. П., Капкаев Ю. Ш. Отходы производств и потребления – резерв строительных материалов. Челябинск: Изд-во ЧелГУ, 2017. 477 с.
23. Khan M. N. A., Liaqat N., Ahmed I., Basit A., Umar M., Khan M. A. Effect of brick dust on strength and workability of concrete // IOP: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 414. Article number 012005. P. 1–6. <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/414/1/012005>
24. Rao M. C. Influence of brick dust, stone dust, and recycled fine aggregate on properties of natural and recycled aggregate concrete // Structural Concrete. 2021. Vol. 22. Issue S1. P. E105–E120. <https://doi.org/10.1002/suco.202000103>
25. Естемесов З. А., Султанбеков Т. К., Сарсенбаев Н. Б., Сауганова Г. Р. Строительные отходы – неисчерпаемый источник богатства для строителей // Вестник ГГНТУ. Технические науки. 2020. Т. 16. № 4 (22). С. 57–63. <https://doi.org/10.34708/GSTOU.2020.70.30.008>
26. Харо О. Е., Левкова Н. С., Лопатников М. И., Горностаева Т. А. Использование отходов переработки горных пород при производстве нерудных строительных материалов // Строительные материалы. 2003. № 9. С. 18–19.

Статья поступила в редакцию 16 января 2023 года

The use of fine fractions of waste from stone quarries in Azerbaijan as sand in the preparation of concrete

Niyaz Gadym ogly VALIEV^{1*}

Zarifa Jahangir kzy AFANDIYEVA^{2**}

Takhim Rustam ogly OSMANLY^{2***}

¹Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia

²Azerbaijan State Oil and Industry University, Baku, Republic of Azerbaijan

Abstract

Relevance. In recent years, the enterprises of the construction industry of the republic are experiencing an acute need for inert materials, especially for fine aggregates. The sand deposits available in Absheron are very insignificant and, moreover, in some cases do not meet the requirements of regulatory documents. As a result, it is necessary to use imported sands, which are also not always of satisfactory quality due to their significant fine grain and high content of clay and silt particles. In addition, the use of imported sands significantly affects the cost of finished products. Therefore, the study of the possibility of using fine fractions of stone quarry waste instead of sand in the preparation of heavy concrete is very timely and of undoubted interest.

In the article, the characteristics of the materials used for the preparation of concrete are considered in sufficient detail, the main properties of limestone sand with different content of dust particles are investigated, the influence of the properties of limestone sand on the strength characteristics of concrete and their resistance to various temperature and humidity influences is studied. For the purpose of comparison, samples were simultaneously made using river sand from the Mingchevir deposit. The obtained results show that in concrete on gravel and crushed stone when using limestone sand, in comparison with concrete on natural sand, the consumption of cement per 1m³ of concrete slightly increases.

The purpose of the research. The article deals with the problem of using fine fractions of stone quarry waste as sand in the preparation of concrete.

Research methodology. A simple technique was used to determine the volume increment upon swelling. The physical and mechanical tests of sand have been conducted, the study of the particle size modulus when mixed with gravel and crushed stone and the ability to increase volume during swelling are shown.

Results. The use of cheap local wastes of shell limestones as small and large aggregates of concrete will make it possible to somewhat cover the need of the construction industry of the republic for aggregates, especially for fine aggregates.

Conclusions. Limestone sands obtained by sawing the shell limestones of the Apsheron Peninsula are a suitable fine aggregate for the preparation of concrete.

Keywords: stone quarry, waste, shell limestone, concrete, aggregate, limestone sand, limestone fines.

REFERENCES

1. Geology of Azerbaijan. Vol. VI. Minerals. Baku, 2003, 576 p. (*In Russ.*)
2. Mineral resources of Azerbaijan. Baku, 2005, 807 p. (*In Russ.*)
3. Akhundov T. G., Samedov M. A., Fataliev S. A. 1978, Porous fillers from stone sawing waste. *Stroitel'nyye materialy* [Construction materials], no. 5, pp. 20–22. (*In Russ.*)
4. Grozav V. I., Mutalibova G. K. 2001, Reduction of the average density of concrete based on aggregates from the waste of stone sawing of limestone-shell rocks. Environmental engineering of agricultural territories: materials of scientific and technical conference. Moscow, pp. 105–106. (*In Russ.*)
5. Mutalibova G. K. 2007, Substantiation of methods of using wastes of limestone-shell rock sawing for reclamation of disturbed lands, PhD thesis. Dagestan, 219 p. (*In Russ.*)
6. Study of Georgian rocks for the production of light porous aggregates and products based on them. Tbilisi, 1989, 152 p. (*In Russ.*)
7. Demyanova V. S., Chumakova O. A. 2014, The use of fine building sands in the composition of cement compositions. Penza, 124 p. (*In Russ.*)
8. Khafizova E. N., Akhtyamov V. F. 2017, Concrete production based on industrial non-metallic wastes. *Vestnik TGASU* [Journal of Construction and Architecture], no. 4, pp. 107–116. (*In Russ.*)
9. Khafizova E. N., Panchenko Yu. F., Panchenko D. A. 2021, Use of rock crushing technological wastes for cement concrete compositions. *Vestnik SibADI* [The Russian Automobile and Highway Industry Journal], vol. 18, no. 6 (82), pp. 790–799. (*In Russ.*) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-790-799>
10. Vasilkov S. G. [et al.], 1987, Artificial porous aggregates and light concrete based on them: a reference guide. Moscow, 304 p. (*In Russ.*)
11. Akhtyamov V. F., Khafizova E. N. 2018, Influence of technological non-metallic production wastes on heavy weight concrete properties *Vestnik SibADI* [The Russian Automobile and Highway Industry Journal], vol. 15, no. 2 (60), pp. 261–268. (*In Russ.*) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2018-2-261-268>

✉ science@ursmu.ru

**efendi2005@rambler.ru

***tahir.osmanli@mail.ru

12. Gupta A., Gupta N., Saxena K. K., Goyal S. K. 2021, Investigation of the mechanical strength of stone dust and ceramic waste based composite. *Materials Today: Proceedings*, vol. 44, part 1, pp. 29–33. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.011>
13. Cavaleri L., Borg R. P., La Mantia F. P., Liguori V. 2018, Quarry limestone dust as fine aggregate for concrete. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 442, pp. 1–11. Article number 012003. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/442/1/012003>
14. Petrov V. P. 2005, Porous aggregates from industrial waste. Samara, 152 p. (*In Russ.*)
15. The use of industrial waste and by-products of other industries in the production of building materials and structures: research report, 1973, 109 p. (*In Russ.*)
16. Potapov Yu. B., Puzyrev A. I. 1989, Cement binder for concrete, filled with waste from the chemical industry. Abstracts of reports. Penza, 45 p. (*In Russ.*)
17. Elinzon M. P. 1959, Slags as filler for lightweight concrete. Moscow, 196 p. (*In Russ.*)
18. Korenkova S. F., Makridov G. V. 1999, The use of sludge waste in the production of lightweight concrete. Modern problems of building materials science. Voronezh, pp. 210–212. (*In Russ.*)
19. Kukina O. B. 2002, Technogenic calcium carbonate waste and the technology of their use in building materials, taking into account the structure-forming role, PhD thesis. Voronezh, 186 p. (*In Russ.*)
20. Efendieva Z. J. 2005, Characteristics of deposits and physical properties of facing stones of Azerbaijani deposits. *Gornyy zhurnal* [Mining Journal], no. 8, pp. 46–47. (*In Russ.*)
21. Gusev A. D. 2012, Effective building materials using man-made waste, PhD thesis. Penza, 187 p. (*In Russ.*)
22. Barkhatov V. I., Dobrovolsky I. P., Kapkaev Yu. Sh. 2017, Production and consumption waste – a reserve of building materials. Chelyabinsk, 477 p. (*In Russ.*)
23. Khan M. N. A., Liaqat N., Ahmed I., Basit A., Umar M., Khan M. A. 2018, Effect of brick dust on strength and workability of concrete. *IOP: Materials Science and Engineering*, vol. 414, article number 012005, pp. 1–6. <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/414/1/012005>
24. Rao M. C. 2021, Influence of brick dust, stone dust, and recycled fine aggregate on properties of natural and recycled aggregate concrete. *Structural Concrete*, vol. 22, issue S1, pp. E105–E120. <https://doi.org/10.1002/suco.202000103>
25. Yestemesov Z. A., Sultanbekov T. K., Sarsenbaev N. B., Sauganova G. R. 2020, Construction waste is an inexhaustible source of wealth for builders. *Vestnik GGNTU. Tekhnicheskoye nauki* [Herald of GSTOU. Technical Sciences], vol. 16, no. 4 (22), pp. 57–63. (*In Russ.*) <https://doi.org/10.34708/GSTOU.2020.70.30.008>
26. Khara O. E., Levkova N. S., Lopatnikov M. I., Gornostaeva T. A. 2003, The use of rock processing waste in the production of non-metallic building materials. *Stroitel'nyye materialy* [Construction Materials], no. 9, pp. 18–19. (*In Russ.*)

The article was received on January 16, 2023

Песчаные интрузии в палеогеновых отложениях Ульяновско-Сызранского Поволжья (восток Русской плиты)

Надежда Иосифовна АФАНАСЬЕВА*

Светлана Олеговна ЗОРИНА**

Константин Игоревич НИКАШИН***

Надя ХАМАДА****

Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

Аннотация

Актуальность работы. Кварцевые пески и песчаники сосновской толщи палеогена Ульяновско-Сызранского Поволжья активно разрабатываются в качестве многочисленных видов нерудного минерального сырья, особую ценность среди которых представляет стекольное кварцевое сырье. Это дефицитный вид минерального сырья федерального значения, потребление которого ежегодно увеличивается, но при этом возможности прогнозирования новых песчаных залежей на основе представлений о прибрежно-морском происхождении сосновской толщи практически исчерпаны.

Целью работы является рассмотрение сосновской толщи под новым ракурсом – в качестве комплекса песчаных интрузий и определение возможности повышения точности прогноза новых объектов песчаного сырья.

Методы проведения работы. Для обоснования генетического родства сосновских песков и базальных песков лукояновской свиты батского яруса проведено геохимическое изучение 35 проб песков обеих толщ методами масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой и рентгено-флуоресцентного анализа. Проведено моделирование механизма образования сосновской толщи с построением пространственных моделей.

Результаты работы. Сосновская толща палеогена Ульяновско-Сызранского Поволжья рассмотрена под ракурсом комплекса песчаных интрузий, образование которых основано на внедрении песков из слоя-источника (базальных песков лукояновской свиты батского яруса средней юры) в опоково-диатомитовую палеогеновую толщу. Изучение элементно-геохимических особенностей песков сосновской толщи и песков лукояновской свиты бата – показало их сходство и высокую вероятность генетического родства. Определен тектонический триггер образования инжективов. Построенная трехмерная модель фрагмента сосновской толщи демонстрирует изменчивость морфологии песчаной залежи по латерали и вертикали.

Выводы. Геохимическое изучение сосновских и лукояновских песков позволяет дать положительный ответ на вопрос об их генетическом родстве. Тектоническим триггером для внедрения песчаных интрузий, вероятнее всего, послужила активизация Жигулевского разлома в позднем палеоцене. Пространственное моделирование песчаных залежей позволит повысить точность прогнозных построений и снять ограничения на расширение минерально-сырьевой базы стекольного и строительного песчаного сырья.

Ключевые слова: кварцевые пески, песчаники, стекольное сырье, сосновская толща, палеоцен, геохимия, пространственная модель, Ульяновско-Сызранское Поволжье, Русская плита.

Введение

Стекольные кварцевые пески относятся к числу дефицитных видов минерального сырья федерального значения [1], потребление которых ежегодно увеличивается [2]. Месторождения стекольных песков, пригодных для использования в природном виде, встречаются крайне редко. К таковым относится уникальное Ташлинское месторождение (Ульяновская область), которое входит в тройку самых лучших и крупных объектов Европы, наряду с месторождением Гегенбок (Германия) и Фонтенбло (Франция) [3]. Ташлинские пески признаны наилучшими по качеству

стекольными песками в РФ в силу необыкновенной природной однородности состава, выраженной в отсутствии значимых примесей и наличии требуемых ГОСТами рабочих фракций песка. Всего в Приволжском федеральном округе учитываются 26 месторождений стекольных кварцевых песков, при этом основные запасы сосредоточены в Ульяновской области (66 % запасов округа) [4].

Известно, что стратиграфический критерий является одним из основных при поисках большинства видов полезных ископаемых осадочного генезиса [5].

✉ n-afanasieva@rambler.ru

 <http://orcid.org/0000-0003-4335-9251>

** svzorina@yandex.ru

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

*** kostya97@inbox.ru

 <http://orcid.org/0000-0002-4749-9895>

**** nadia.m.hamada@gmail.com

 <http://orcid.org/0000-0003-3269-6842>

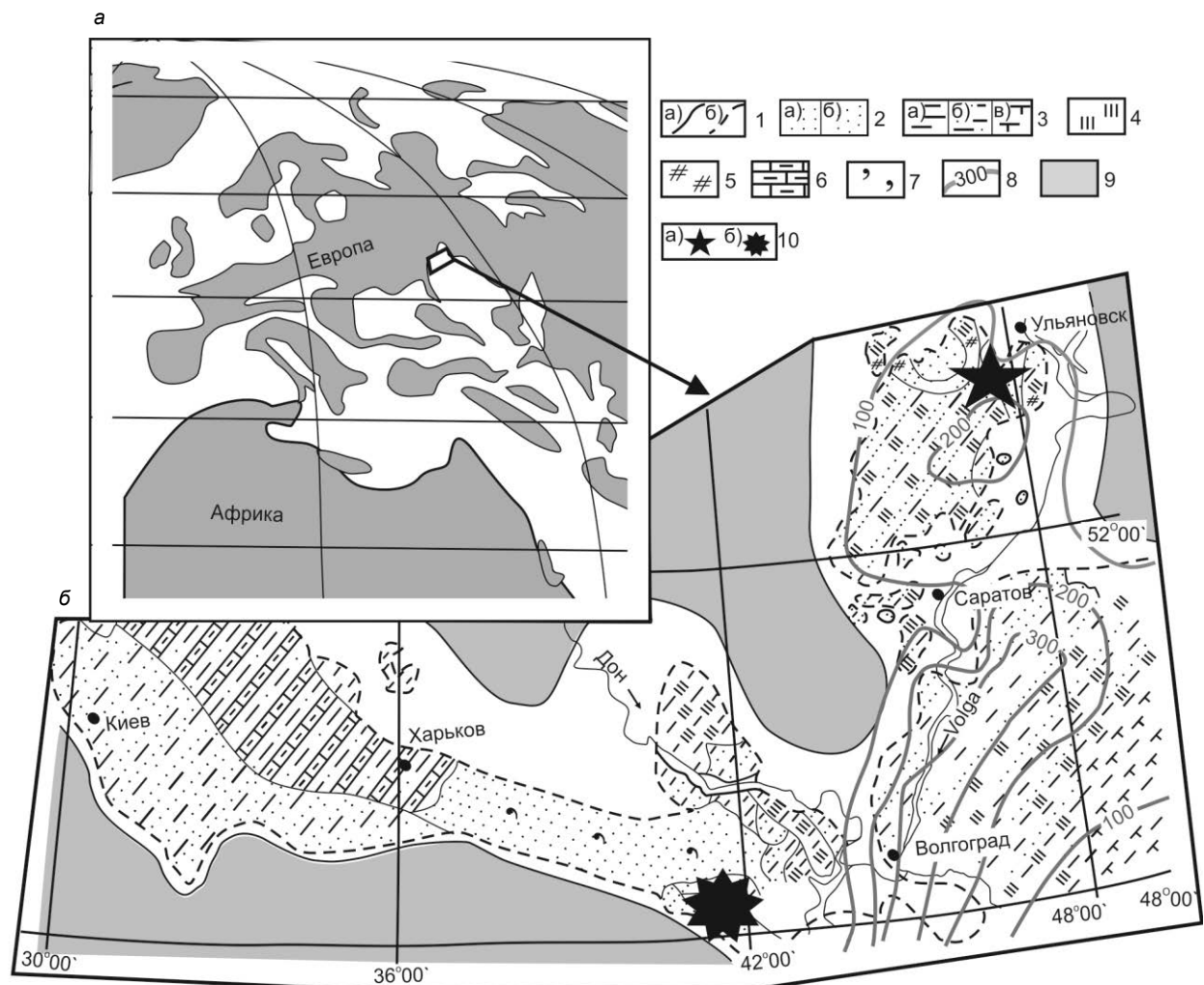


Рисунок 1. Местоположение разрезов бучакской свиты и сосновской толщи: *a* – на палеогеографической карте (упрощено по [10]); *b* – на литолого-фациальной схеме палеоцена и эоцена востока и юга Русской плиты [11]; 1 – геологические границы: *a* – достоверные, *b* – предполагаемые; литология: 2*a* – песчаники, 2*b* – пески; 3*a* – глины, 3*b* – песчаные глины, 3*c* – известковые глины; 4 – опоки; 5 – диатомиты; 6 – мергели; 7 – глауконит; 8 – изопахиты палеоценовых и эоценовых отложений и мощность, м; 9 – области суши; 10 – изученные разрезы; 10*a* – Кучуровский карьер; 10*b* – Тарасовский карьер

Figure 1. Location of sections of the Buchak Formation and Sosnovskaya strata: *a* – on a paleogeographic map (simplified according to [10]); *b* – on the lithofacies scheme of the Paleocene and Eocene of the east and south of the Russian Plate [11]; 1 – geological boundaries: *a* – reliable, *b* – assumed; lithology: 2*a* – sandstones, 2*b* – sands; 3*a* – clays, 3*b* – sandy clays, 3*c* – calcareous clays; 4 – flasks; 5 – diatomites; 6 – marls; 7 – glauconite; 8 – isopachytes of Paleocene and Eocene deposits and thickness, m; 9 – land areas; 10 – studied sections; 10*a* – Kuchurovsky quarry; 10*b* – Tarasovsky quarry

Именно со стратонами, сформировавшимися в морских и континентальных обстановках, связано размещение большинства геолого-промышленных типов неметаллов. Кварцевые стекольные пески Ульяновско-Сызранского Поволжья (УСП) не являются исключением. Их локализация четко связана с распространением определенного стратона – сосновской толщи палеогена [6], которая традиционно считалась прибрежно-морской фацией. Новые данные о крайне неравномерном строении сосновской толщи и ее сложном характере переслаивания с опоками и диатомитами смежных и перекрывающих стратонов [7] позволяют предполагать принципиально иной – «интрузивный» механизм образования сосновских песков.

Ранее [7] нами выдвигалось предположение, что вероятным слоем-источником сосновских песков являются базальные пески лукояновской свиты батского яруса средней юры. Основанием для этого послужила

установленная сходимость минерального состава тяжелых фракций, выраженная в весовых содержаниях минералов титана и циркония (циркона, ильменита, лейкоксена, рутила, сфена) в песках обоих стратонов. Этот факт позволяет с высокой степенью вероятности говорить о генетическом родстве сосновских песков с лукояновскими. В рамках настоящего исследования предполагается обосновать данное предположение с привлечением результатов изучения сосновских и лукояновских пород методом элементной геохимии.

Кроме того, для решения вопроса повышения точности прогноза новых залежей сосновских песков в связи со сложной и изменчивой морфологией рассматриваемой толщи была поставлена задача визуализации пространственного положения конкретной залежи с построением 3D-модели в ГИС-среде.

Строение сосновской толщи. Известно, что кварцевые пески УСП разрабатываются с конца XVII в., а их

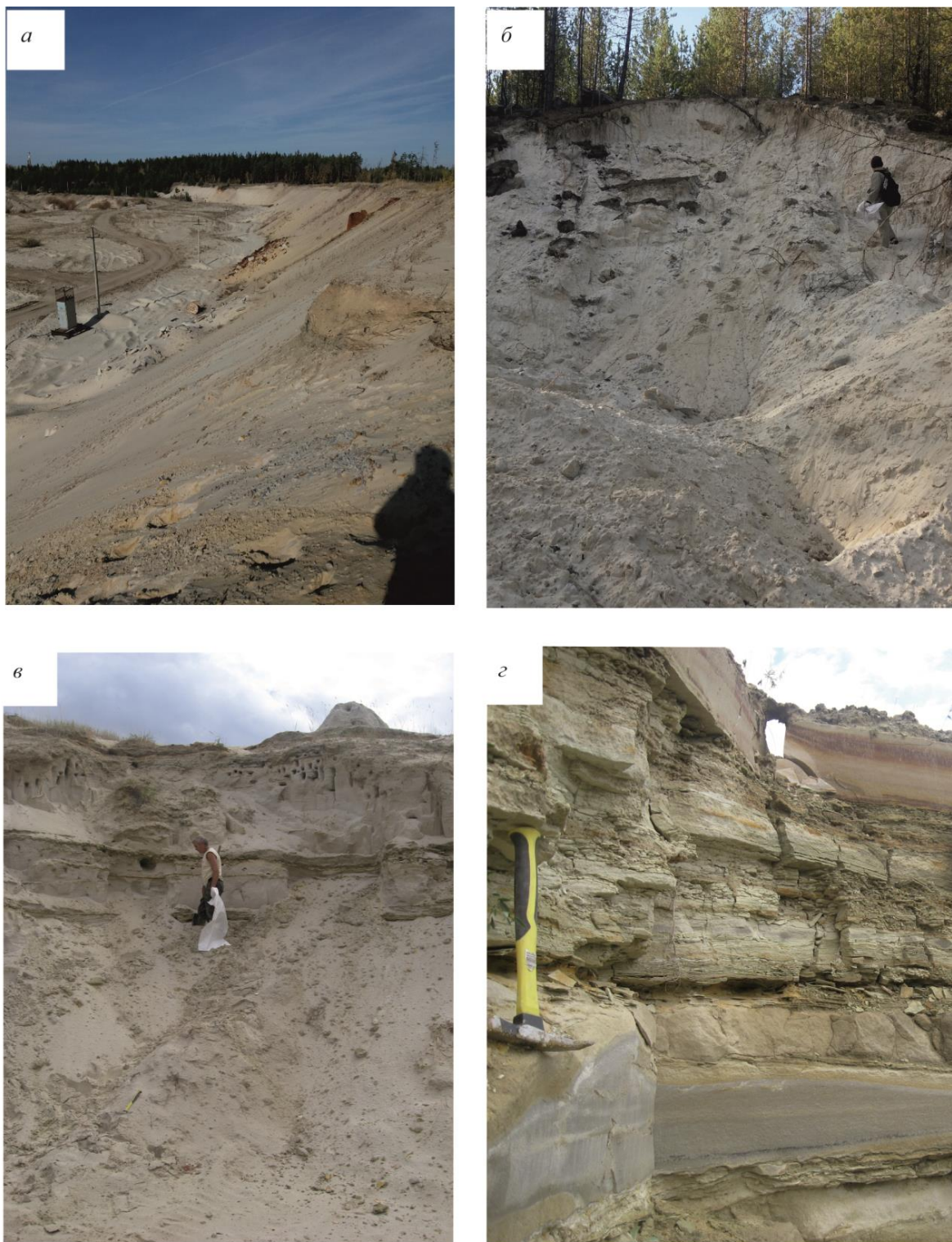


Рисунок 2. Карьеры по добыче песков и песчаников сосновской толщи (а, б) и бучакской свиты (в, г) палеогена: а – сосновские кварцевые пески в карьере Восточно-Ташлинского месторождения (Ульяновская область); б – сосновские пески в карьере Кучуровского месторождения (Ульяновская область); в – бучакские кварцевые пески Тарасовского месторождения (Ростовская область); г – бучакские сливные песчаники Тарасовского месторождения

Figure 2. Open pits for the extraction of sands and sandstones of the Sosnovskaya stratum (a, b) and the Buchak suite (c, d) of the Paleogene: a – Sosnovskaya quartz sands in the quarry of the Vostochno-Tashlinskoye deposit (Ulyanovsk region); b – pine sands in the quarry of the Kuchurovskoye deposit (Ulyanovsk region); c – Buchak quartz sands of the Tarasovskoye deposit (Rostov region); d – Buchak confluent sandstones of the Tarasovskoye deposit

систематическое литолого-стратиграфическое изучение проводится с конца XIX в. Сосновская толща распространена на востоке Русской плиты (РП), в УСП (рис. 1) и

представлена белыми, буровато-, розовато-белыми равномерно-мелкозернистыми кварцевыми песками. Мощность песков крайне не выдержана по простиранию (0–80 м) [6],

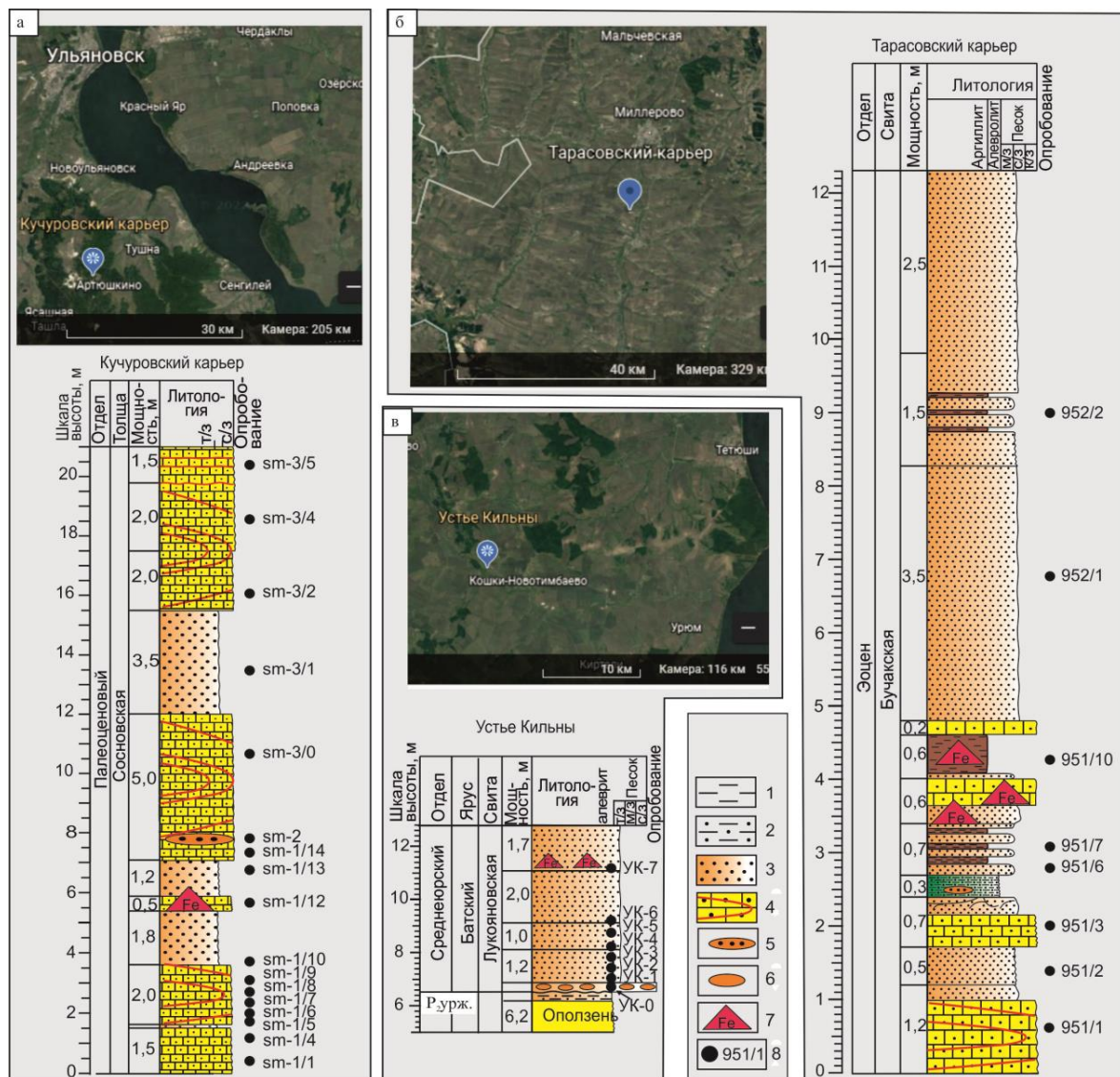


Рисунок 3. Местоположение, геологическое строение и опробование изученных разрезов: а – сосновская толща палеоцена в Кучуровском карьере (Ульяновская область); б – лукояновская свита верхнего бата средней юры в обнажении Устье Кильны (Республика Татарстан); в – бучакская свита эоцена в Тарасовском карьере (Ростовская область); 1 – глины; 2 – алевролиты; 3 – пески; 4 – песчаники конкреционные; 5 – линзы песков; 6 – валуны; 7 – железзение; 8 – пункт отбора пробы и ее номер
Figure 3. Location, geological structure, and sampling of the studied sections: a – Paleocene Sosnovskaya stratum in the Kuchurov quarry (Ulyanovsk region); b – Upper Bathonian Lukoyanov suite, Middle Jurassic, outcrop at the mouth of the Kilna (Republic of Tatarstan); c – Buchak suite of the Eocene in the Tarasov Quarry (Rostov Region); 1 – clay; 2 – siltstones; 3 – sands; 4 – nodular sandstones; 5 – sand lenses; 6 – boulders; 7 – ferruginization; 8 – sampling point and its number

фациально они замещаются очень крепкими сливными кварцевыми песчаниками (мощностью от первых сантиметров до десятков метров) с опаловым и халцедоновым цементом [7–9] (рис. 2, а, б). Пески неравномерно переслаиваются с опоками нижнесызранской свиты, участками они залегают на маастрихтском мелу, но в основном подстилаются палеоценовыми нижнесызранскими опоками, которые прослеживаются практически повсеместно в УСП [6].

Аналоги сосновских песков и сливных песчаников развиты на юге РП, в Днепровско-Донецкой впадине (рис. 1), а также на прилегающих территориях Общего Сырта, Примугоджарья и Приаралья [9], где их мощность достигает 150 м. Так, в междуречье Днепра и Дона выделяется каневско-бучакская толща ипра-лутета, представленная песками и сливными песчаниками [12] (рис. 2, в, г), кото-

рая, предположительно, является объектом-аналогом сосновской толщи УСП [13].

Материалы и методы

При проведении полевых работ в 2021–2022 гг. авторами было проведено геологическое изучение и опробование песков сосновской толщи в Кучуровском карьере и базальных песчаников лукояновской свиты в обнажении Устье Кильны (рис. 3).

Недействующий Кучуровский карьер по добыче песчаников сосновской толщи расположен в Сенгилеевском районе Ульяновской области, в 26 км западнее г. Сенгилей (рис. 3, а). В западной стенке карьера был задокументирован фрагмент сосновской толщи мощностью 21 м, представленный чередованием песков желтовато- и розовато-серых, кварцевых, тонко-мелкозернистых, рыхлых,

Таблица 1. Микроэлементный состав и геохимические индексы пород сосновской толщи, бучакской и лукояновской свит
 Table 1. Trace element composition and geochemical indices of rocks of the Sosnovskaya stratum, Buchakskaya and Lukoyanovskaya suites

Стратон	Номера проб	Литология	Sc, ppm	Ti, ppm	Cr, ppm	Co, ppm	Y, ppm	Zr, ppm	La, ppm	Hf, ppm	Th, ppm	Zr/10	Ti/Zr	La/Sc	La/Th
Сосновская толща	Sm-1/1	Песчаник	0,11	172,64	9,89	0,72	0,84	14,26	1,11	0,35	0,23	1,43	12,10	10,10	4,80
	Sm-1/4	Песчаник	0,38	349,47	11,47	0,67	1,12	18,75	1,63	0,48	0,33	1,88	18,60	4,30	4,94
	Sm-1/5	Песчаник	0,37	228,32	10,01	0,96	1,16	19,78	1,73	0,48	0,29	1,98	11,50	4,70	6,05
	Sm-1/6	Песчаник	0,34	222,51	9,58	2,29	1,15	21,05	1,46	0,50	0,30	2,11	10,60	4,20	4,91
	Sm-1/7	Песчаник	0,30	196,98	8,19	1,35	1,03	15,13	1,24	0,39	0,25	1,51	13,00	4,10	4,98
	Sm-1/8	Песчаник	0,13	289,69	7,16	1,84	0,87	16,44	1,25	0,40	0,26	1,64	17,60	9,30	4,82
	Sm-1/9	Песчаник	0,09	157,32	7,96	0,37	0,59	12,11	0,75	0,31	0,20	1,21	13,00	8,10	3,84
	Sm-1/10	Песок	0,27	252,70	7,80	1,10	0,87	19,27	1,25	0,48	0,27	1,93	13,10	4,70	4,60
	Sm-1/12	Песчаник	0,20	174,23	7,34	0,36	0,76	14,03	1,29	0,36	0,20	1,40	12,40	6,60	6,58
	Sm-1/13	Песок	0,21	233,26	9,25	0,39	0,94	18,17	1,36	0,45	0,27	1,82	12,80	6,60	5,03
	Sm-1/14	Песчаник	0,37	135,29	8,01	0,33	0,66	13,78	1,23	0,30	0,21	1,38	9,80	3,30	5,96
	Sm-2	Песок	0,12	356,49	8,16	4,17	1,02	19,10	1,42	0,49	0,24	1,91	18,70	12,20	5,83
	Sm-3/0	Песчаник	0,14	146,21	7,41	1,09	0,66	11,94	1,01	0,30	0,18	1,19	12,20	7,10	5,69
	Sm-3/1	Песок	0,26	225,90	6,06	0,25	0,71	22,36	0,93	0,53	0,25	2,24	10,10	3,50	3,74
Sm-3/2	Песчаник рыхлый	1,61	469,93	22,87	0,64	1,60	28,63	3,42	0,73	0,79	2,86	16,40	2,10	4,35	
Sm-3/4	Песчаник рыхлый	1,66	191,76	11,20	1,36	2,96	16,17	2,35	0,45	0,50	1,62	11,90	1,40	4,68	
Sm-3/5	Песчаник	0,31	166,17	9,05	0,28	0,94	15,58	1,77	0,41	0,35	1,56	10,70	5,70	5,01	
Kuch-1	Песок	0,32	196,30	7,38	0,20	0,78	18,20	0,73	0,46	0,29	1,82	10,80	2,30	2,51	
Kuch-2	Песчаник	0,85	159,55	8,11	0,29	0,54	66,40	0,59	0,94	0,19	6,64	2,40	0,70	3,09	
Лукояновская свита	УК-0	Песчаник из валуна	13,83	2344,98	384,61	17,70	176,27	57,90	16,86	1,27	1,96	5,79	40,50	0,04	8,61
	УК-1	Песок глинистый	16,27	3433,59	300,49	22,41	140,21	77,79	9,93	1,72	2,37	7,78	44,10	0,05	4,18
	УК-2	Песок глинистый	16,96	3513,11	249,39	23,23	127,15	82,30	13,14	1,82	2,50	8,23	42,70	0,07	5,25
	УК-3	Песок глинистый	17,52	3045,92	167,03	20,19	129,32	78,90	10,82	1,79	2,24	7,89	38,60	0,10	4,83
	УК-4	Песок глинистый	17,83	3591,23	258,53	23,37	136,94	80,85	12,76	1,67	2,46	8,09	44,40	0,07	5,19
	УК-5	Песок глинистый	16,73	3203,24	215,98	20,95	135,59	73,11	12,82	1,67	2,44	7,31	43,80	0,08	5,26
	УК-6	Песок глинистый	10,04	2079,66	221,31	13,27	103,99	83,84	10,51	1,77	2,07	8,38	24,80	0,05	5,09
УК-7	Песок глинистый	14,79	3472,05	327,44	42,96	113,16	109,99	22,36	2,54	5,41	11,00	31,60	0,05	4,13	
Бучакская свита	951/1	Песчаник сливной	1,30	531,70	30,68	1,46	3,68	36,18	8,60	1,11	1,41	3,62	14,69	6,60	6,08
	951/2	Песок	0,21	274,90	7,39	0,32	1,28	19,27	2,43	0,59	0,52	1,93	14,26	11,70	4,69
	951/3	Песчаник	0,62	387,80	13,08	0,79	2,76	24,98	5,45	0,76	1,00	2,50	15,53	8,86	5,45
	951/6	Песчаник	0,66	430,10	7,90	0,33	1,67	28,92	3,61	0,85	0,71	2,89	14,87	5,44	5,06
	951/7	Песчаник глинистый	1,26	594,70	346,56	1,85	2,83	29,93	5,71	0,92	1,26	2,99	19,87	4,53	4,53
	951/10	Песчаник глинистый	2,77	1185,50	33,59	1,50	5,77	61,65	12,25	1,84	3,03	6,17	19,23	4,42	4,05
	952/1	Песок	0,37	558,00	14,60	0,87	1,75	30,69	2,47	0,87	0,69	3,07	18,18	6,60	3,58
	952/2	Песок	8,23	2810,40	297,48	16,22	21,23	128,31	33,56	3,85	8,31	12,83	21,90	4,08	4,04

неслоистых (мощностью 0,1–3,5 м) и песчаников серых, кварцевых, конкреционных, очень крепких, с гиганто-раковистой поверхностью скола (мощностью 0,4–5 м). Для проведения геохимического анализа было отобрано 19 проб.

Обнажение песчаников лукояновской свиты верхне-батского подъяруса средней юры Устье Кильны расположено в Тетюшском районе Татарстана, в 25 км юго-западнее г. Тетюши (рис. 3, в). На элювированной поверхности алевролитов уржумского яруса средней перми залегают пески зеленовато-серые, тонкозернистые алевритистые, плотные, мощностью 5,2 м, они согласно перекрыты темно-серыми лукояновскими глинами. Для проведения геохимического анализа из песков было отобрано 8 проб.

Ранее, в 2012 г., авторами был изучен фрагмент бучакской свиты эоцена в карьере Тарасовского месторождения песков и песчаников (Ростовская область) (рис. 3, в). Свита представлена песчаниками зеленовато-светло-серыми, кварцевыми, окремненными, сливными, конкреционно-слоистыми, с гиганто-раковистой поверхностью скола (мощностью 0,2–1,2 м) с прослоями сильно ожелезненных аргиллитоподобных конкреционно-корочковидных алевролитов (мощностью

0,3–0,6 м) и песками кремово-белыми, мелкозернистыми, кварцевыми, участками слоистыми (мощностью 0,5–7,5 м) с редкими прослоями зеленовато-серых бентонитоподобных глин (мощностью 5–25 см). Для изучения геохимических особенностей пород было отобрано 8 проб (рис. 3, в).

Геохимическое изучение 35 проб проведено методами масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) и рентгенофлуоресцентного анализа (РФА). Микро- и макроэлементный состав образцов определялся на изотопном масс-спектрометре iCAP Qc (Thermo Fisher Scientific) и рентгенофлуоресцентном спектрометре S8 Tiger (Bruker) соответственно. Аналитические работы выполнены в лабораториях ИГиНГТ КФУ. Обработка концентраций элементов проведена с использованием палеотектонических дискриминантных диаграмм.

В основу построения трехмерной модели сосновской толщи положены фактические данные о распространении, мощности и стратиграфическом положении ее кровли и подошвы, приведенные в 20 производственных отчетах и материалах изданных цифровых комплектов госгеокарт 200/3. Построение осуществлялось в программном комплексе ArcGIS и в свободно распространяемой про-

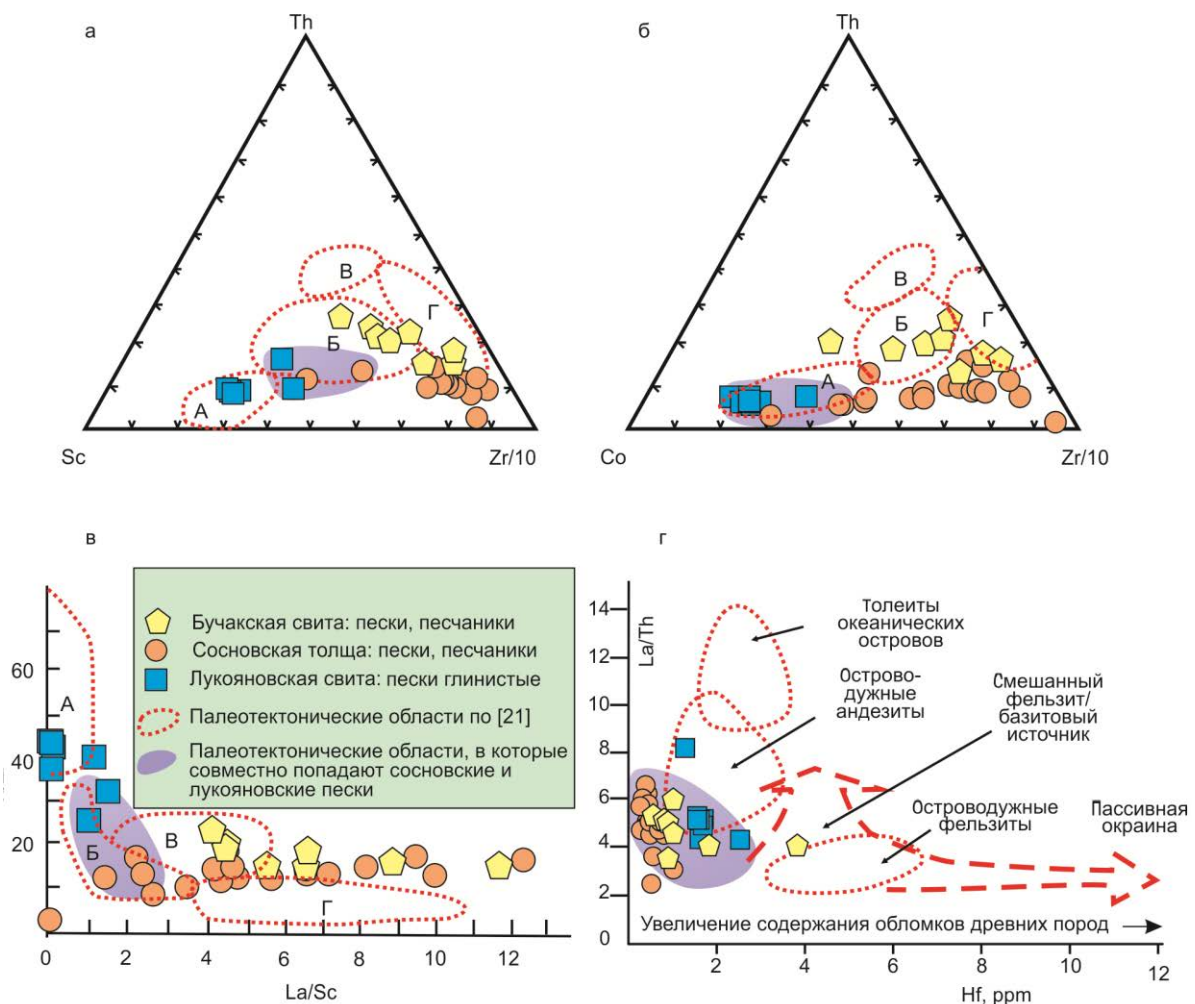


Рисунок 4. Распределение фигуративных точек на палеогеодинамических дискриминантных диаграммах: а – Sc–Th–Zr/10 [19]; б – Co–Th–Zr/10 [19]; в – Ti/Zr–La/Sc [19]; г – La/Th–Hf [20]. Палеотектонические области: А – океаническая островная дуга; Б – континентальная островная дуга; В – активная континентальная окраина; Г – пассивная окраина [21]

Figure 4. Distribution of figurative points on paleogeodynamic discriminant diagrams: а – Sc–Th–Zr/10 [19]; б – Co–Th–Zr/10 [19]; в – Ti/Zr–La/Sc [19]; г – La/Th–Hf [20]. Paleotectonic regions: А – oceanic island arc; В – continental island arc; В – active continental margin; Д – passive margin [21]

грамме Blender. На первом этапе в программе ArcMap на основе геологических карт, скважинных данных и данных из обнажений производилось оконтуривание песчаной залежи. Полученные данные экспортировались в Blender, где на их основе строились серии продольных и поперечных разрезов для каждого тела. На завершающем этапе данные разрезов интерполировались, что позволило получить трехмерные модели изучаемых тел.

Результаты и обсуждение

Песчаные интрузии и механизм их образования.

В российской геологической литературе данных о песчаных интрузиях крайне мало. Имеются сведения о песчаных интрузиях, образовавшихся в результате перемещения песка, насыщенного подземными водами [14]. В зарубежных публикациях песчаные интрузии (sand injectites) определены как структуры, образующиеся в результате внедрения флюидизированных песков в вышележащие пласты под воздействием избыточного давления [15, 16]. В конце XX в. была установлена приуроченность к ним залежей углеводородов в Североморской и многих других нефтегазоносных провинциях [15, 17].

При образовании песчаных интрузий и экструзий должно соблюдаться несколько важных условий [15–18]. Источник песчаного материала залегает на значительной глубине, а вмещающими породами непременно должны быть глинистые (слабопроницаемые) осадки, так как при уплотнении они становятся более вязкими и более прочными на разрыв [17]. Внедрение несцементированных флюидизированных песков и формирование интрузивных тел возможно именно в таких породах.

Геохимические особенности сосновских и лукояновских песков. Проведенное геохимическое изучение сосновских и лукояновских песков позволяет дать положительный ответ на вопрос об их генетическом родстве. Вполне естественно, что пески этих толщ должны иметь существенные геохимические различия в силу их разного возраста и стратиграфического положения. Поэтому в ходе исследования решалась сложная задача поиска индикативных геохимических отношений, позволяющих выявить геохимические признаки сходства рассматриваемых толщ. Концентрации отдельных микроэлементов в песках и песчаниках сосновской толщи, бучакской и лукояновской свит и значения рассчитанных индексов приведены в табл. 1.

Одним из самых показательных инструментов оказался провенантный анализ с использованием палеотектонических дискриминантных диаграмм (рис. 4). На треугольных диаграммах Sc–Th–Zr/10 и Co–Th–Zr/10 [19] (рис. 4, а, б) фигуративные точки сосновской толщи в основном сгруппированы у пассивной окраины, но отдельные пробы попали в области континентальной (рис. 4, а) и океанической островных дуг (рис. 4, б).

Фигуративные точки лукояновской свиты сгруппированы преимущественно в области океанической островной дуги, отдельные пробы – в области континентальной дуги (рис. 4, а). Отчетливо проявлены области совместного расположения ряда точек обеих толщ, приуроченные к областям континентальной (рис. 4, а) и океанической островных дуг (рис. 4, б).

На дискриминантной диаграмме Ti/Zr–La/Sc [19] (рис. 4, в) точки сосновской толщи рассеяны по всем обла-

стям, кроме океанической островной дуги, тогда как точки лукояновской свиты в основном сгруппированы в зоне океанической дуги. При этом отдельные лукояновские пробы попадают в область континентальной островной дуги, где образуют область совместного нахождения с отдельными пробами сосновской толщи.

Наиболее показательной оказалась диаграмма La/Th–Hf [20] (рис. 4, г), так как на ней практически все исследованные пробы сосновской толщи, бучакской и лукояновской свит сгруппировались вблизи одной области – островодужных андезитов. Примечательны низкие концентрации Hf во всех пробах (не более 2,5 ppm), которые свидетельствуют об отсутствии в породах обоих стратонов рециркулированного (древнего) материала [20]. Исходя из данной диаграммы, можно заключить, что в породах всех рассмотренных стратонов присутствует свежий вулканогенный материал базитового состава. Данный факт говорит в пользу генетического родства сосновской толщи и лукояновской свиты.

Таким образом, на всех дискриминантных палеогеодинимических диаграммах Sc–Th–Zr/10, Co–Th–Zr/10, Ti/Zr–La/Sc [19] и La/Th–Hf [20] выявлены области совместного расположения фигуративных точек сосновской толщи и лукояновской свиты (континентальной и океанской островных дуг), подтверждающие геохимическое сходство питающих провинций этих стратонов.

Моделирование механизма образования сосновской толщи.

Недавно проведенными исследованиями [7, 13] было показано, что наиболее вероятным механизмом образования сосновской толщи является внедрение песчаных интрузий в нижнепалеогеновую опоково-диатомитовую толщу. Источником песчаного материала, залегающего на значительной глубине (300–500 м), могли служить кварцевые пески лукояновской свиты батского яруса [7] (рис. 5), имеющие минералогическое и, как выяснилось в ходе настоящего исследования, геохимическое сходство с песками сосновской толщи.

Ранее выдвигалось предположение, что «спусковым механизмом» выдавливания песчаных масс послужило образование субвертикальных трещин в карбонатно-глинистой юрско-меловой толще, по-видимому, вследствие активизации в палеоцене Пачелмского авлакогена [13, 22], структуры которого осложняют кристаллический фундамент непосредственно в зоне развития сосновских песков. Данное предположение находит свое подтверждение в материалах изданных листов госгеолкарты-200/3 N-38-XXV (Сызрань) [23] и N-38-XXX (Новоспасское) [24].

По данным [23], в конце палеоцена Жигулевско-Пугачевский свод испытал значительный подъем, который фиксируется взбросом с амплитудой до 350–450 м. Амплитуда взброшенного крыла по поверхности кристаллического фундамента составляет около 400 м. В районе Сызранской структуры, судя по сопоставлению данных скважин № 59 и 152, амплитуда вертикального перемещения смежных блоков кристаллического фундамента составляет 719 м [23]. Не вызывает сомнений, что образование в палеоцене Жигулевского взброса такой высокой амплитуды могло быть триггером внедрения песчаных палеогеновых интрузий на территории УСП.

Инъектный механизм образования сосновской толщи предопределяет крайне изменчивую морфологию песчаной

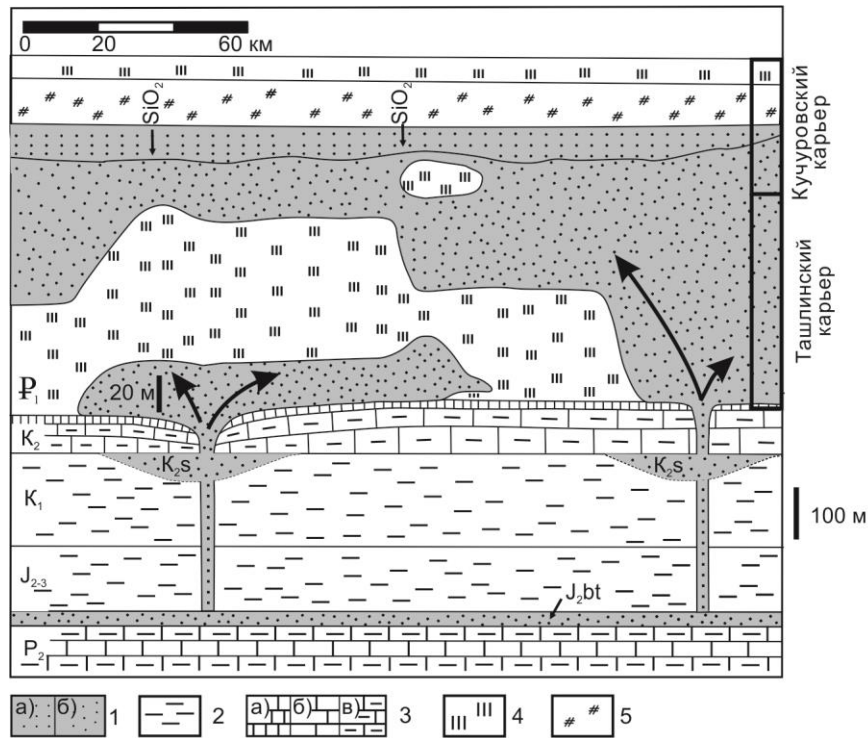


Рисунок 5. Литолого-генетическая инъектная модель образования сосновской толщи (по [7] с дополнениями): 1а – песчаник; 1б – песок; 2 – глина; 3а – мел; 3б – известняк; 3в – мергель; 4 – опока; 5 – диатомит. Геологические индексы отложений: P₂ – среднепермские, J_{2,3} – батский ярус средней юры, J₂₋₃ – средне-верхнеюрские, K₁ – нижнемеловые, K_{2s} – сеноманский ярус верхнего мела, K₂ – верхнемеловые, P₁ – палеоценовые

Figure 5. Lithological-genetic injection model of the formation of the Sosnovskaya stratum (according to [7] with additions): 1a – sandstone; 1b – sand; 2 – clay; 3a – chalk; 3b – limestone; 3c – marl; 4 – flint; 5 – diatomite. Geological indices of deposits: P₂ – Middle Permian, J_{2,3} – Bathonian stage of the Middle Jurassic, J₂₋₃ – Middle-Upper Jurassic, K₁ – Lower Cretaceous, K_{2s} – Cenomanian stage of the Upper Cretaceous, K₂ – Upper Cretaceous, P₁ – Paleocene

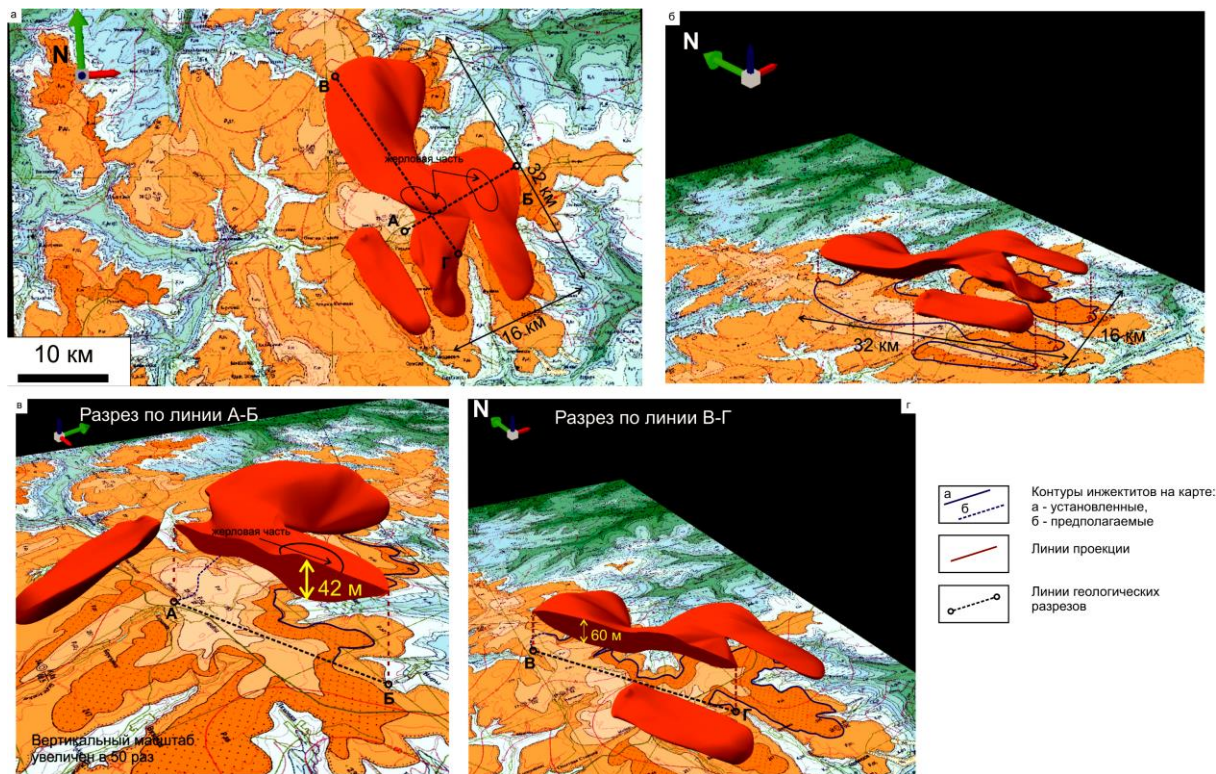


Рисунок 6. Трехмерная модель фрагмента сосновской толщи (Майнский инъектит): а – проекция модели на геологическую карту ГГК-200/3 листа N-38-XVIII [25]; б – перспективный ракурс модели; в, г – профили по линиям А–Б и В–Г

Figure 6. Three-dimensional model of a fragment of the Sosnovskaya stratum (Mainskiy injectite): а – projection of the model on the geological map GGC-200/3 sheet N-38-XVIII [25]; б – perspective view of the model; в, г – profiles along lines A–B and C–D

залежи. Это наглядно демонстрируют пространственные модели толщи (рис. 6). Поэтому, на наш взгляд, очевидно, что проведение прогнозных построений и последующих поисково-оценочных и разведочных работ на стекольное и строительное сырье целесообразно проводить с использованием 3D-модели конкретной залежи.

Заключение

Сосновская толща палеогена УСП рассмотрена под ракурсом комплекса песчаных интрузий, образование которых основано на внедрении песков из слоя-источника (предположительно – базальных песков лукояновской свиты батского яруса средней юры) в опоково-диатомитовую палеогеновую толщу.

Геохимическое изучение сосновских и лукояновских песков позволяет дать положительный ответ на вопрос об

их генетическом родстве и, следовательно, получить дополнительные данные в пользу признания лукояновской свиты верхнего бата слоем-источником.

Триггером для внедрения песчаных интрузий, вероятнее всего, послужила активизация Жигулевского разлома в позднем палеоцене.

Комплекс сосновских песчаных интрузий может быть рассмотрен в качестве новой научной основы для проведения прогнозных работ на песчаное сырье. Учитывая крайне изменчивую морфологию песчаной залежи, проведение прогнозных построений и последующих геологоразведочных работ на стекольное и строительное сырье целесообразно проводить с использованием 3D-модели конкретной залежи.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-27-00070, <https://rscf.ru/project/22-27-00070/>

ЛИТЕРАТУРА

1. Стратегия развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации до 2035 года: утв. распоряжением Правительства РФ от 22 декабря 2018 г. № 2914-р / Минприроды РФ, 2018. <http://government.ru/docs/35247/>
2. Бирюлев Г. Н., Тохтасьев В. С., Ефремов А. Н., Кандауров П. М. О состоянии и перспективах развития минерально-сырьевой базы для стекольной промышленности // Разведка и охрана недр. 2012. № 5. С. 20–24.
3. Бирюлев Г. Н. Минерально-сырьевая база стекольного сырья Российской Федерации: состояние, использование, перспективы развития // Георесурсы. 2015. № 4. Вып. 63. С. 21–24. <http://dx.doi.org/10.18599/grs.63.4.3>
4. Состояние и характеристика ресурсной базы углеводородного сырья и твердых полезных ископаемых в Приволжском федеральном округе по состоянию на 01.01.2018 г. <https://pfo.rosnedra.gov.ru/page/150.html?mm=511&ml=414>
5. Минерация осадочного чехла востока Русской платформы / У. Г. Дистанов [и др.]. Казань: Плутон, 2004. 352 с.
6. Ахметьев М. А., Шик С. М., Алексеев А. С. (ред.) Унифицированная стратиграфическая схема палеогеновых отложений Поволжско-Прикаспийского субрегиона. М.: ВНИГНИ, 2015. 96 с.
7. Zorina S. O., Afanasyeva N. I. The sand injectites in the Russian Platform's Paleogene sediments // Stratigraphy and Sedimentology of Oil-Gas Basins. 2012. Vol. 2. P. 35–48.
8. Дистанов У. Г., Гимадеев Р. А. Песчаники палеогена Ульяновского Поволжья, их состав и свойства // Стратиграфия, палеогеография и полезные ископаемые кайнозой Среднего Поволжья. Казань: труды Геологического института, 1968. Вып. 19. С. 156–168.
9. Муравьев В. И., Цеховский Ю. Г., Каледя К. Г., Бабушкин Д. А., Суворов А. И. Процессы окремнения в палеогеновых песчаниках Восточно-Европейской платформы // Литология и полезные ископаемые. 1997. № 2. С. 150–162.
10. Scotese C. R. The PALEOMAP Project PaleoAtlas for ArcGIS. 2014. Ver. 2. Vol. 1. Cenozoic Plate Tectonic, Paleogeographic, and Paleoclimatic Reconstructions. Maps 1–15. PALEOMAP Project. Evanston, IL.
11. Атлас литолого-палеогеографических карт СССР / А. П. Виноградов (гл. ред.). Т. 4. Палеогеновый, неогеновый и четвертичный периоды. М.: Мингео СССР, 1967. 55 карт.
12. Горбаткина Т. Е., Иосифова Ю. И. Новые стратиграфические подразделения палеогена Воронежской антеклизы – воробьевская и пасковская свиты // Вестник Воронежского гос. ун-та. Сер: Геология. 2004. № 2. С. 28–44.
13. Зорина С. О., Афанасьева Н. И., Хайртдинова Л. Р. Событийная модель образования палеоцен-эоценовой песчано-глинисто-силициевой толщи Русской плиты // Докл. Академии наук. 2018. Т. 480. № 1. С. 60–63. <http://doi.org/10.7868/S0869565218130121>
14. Геологический словарь. В 3 т. / гл. ред. О. В. Петров. СПб: ВСЕГЕИ, 2011. Т. 2. 476 с.
15. Subsurface sand remobilization and injection / S. Silcock, M. Huuse, M. Bowman, A. Hurst, S. Cobain (eds). London: The Geological Society, 2021. No. 493. 320 p. <https://doi.org/10.1144/SP493>
16. Madon M. Sand injectites in the West Crocker Formation, Kota Kinabalu, Sabah // Bulletin of the Geological Society of Malaysia. 2020. Vol. 69. P. 11–26. <https://doi.org/10.7186/bgsm69202002>
17. Ross J. A., Peakall J., Keevil G. M. An integrated model of extrusive sand injectites in cohesionless sediments // Sedimentology. 2011. Vol. 58. Issue 7. P. 1693–1715. <http://doi.org/10.1111/j.1365-3091.2011.01230.x>
18. Monnier D., Gay A., Imbert P., Cavailhes T., Soliva R., Lopez M. Sand injectites network as a marker of the palaeo-stress field, the structural framework and the distance to the sand source: Example in the Vocontian Basin, SE France // Journal of Structural Geology. 2015. Vol. 79. P. 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2015.07.001>
19. Bhatia M. R., Crook K. A. W. Trace element characteristics of greywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins // Contributions to Mineralogy and Petrology. 1986. Vol. 92. P. 181–193. <https://doi.org/10.1007/BF00375292>
20. Floyd P. A., Leveridge B. E. Tectonic environment of the Devonian Gramscatho basin, south Cornwall: framework mode and geochemical evidence from turbiditic sandstones // Journal of the Geological Society. 1987. Vol. 144. P. 531–542. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.144.4.0531>
21. Bhatia M. R. Plate tectonics and geochemical composition of sandstones // The Journal of Geology. 1983. Vol. 91. No. 6. P. 611–627. <http://dx.doi.org/10.1086/628815>
22. Кузнецов В. Г. Некоторые особенности развития Прикаспийской впадины // Фундаментальный базис новых технологий нефтяной и газовой промышленности: сборник статей / А. Н. Дмитриевский (ред.). М.: Наука, 2000. С. 81–90.
23. Давлетшин К. А., Косов С. А., Доронина А. П. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 200 000. Сер. Средневожжская. Лист N-39-XXV (Сызрань): объяснит. записка. М.: МФ ВСЕГЕИ, 2017. 92 с. МПР России, ГГП «Волгагеология». URL: <http://geo.mfvsegei.ru/200k/n-39/n-39-25/index.html>
24. Никитин В. Н., Бурнаев В. С., Жукова Г. А. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 200 000. Сер. Средневожжская. Лист N-38-XXX (Новоспасское): объяснит. записка. М.: МФ ВСЕГЕИ, 2013. URL: <http://geo.mfvsegei.ru/200k/n-38/n-38-30/index.html>
25. Жукова Г. А., Турова А. В., Каримова Х. Х. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 200 000. Сер. Средневожжская. Лист N-38-XVIII (Майна): объяснит. записка. М.: МФ ВСЕГЕИ, 2013. 151 с. URL: <http://geo.mfvsegei.ru/200k/n-38/n-38-30/index.html>

Статья поступила в редакцию 26 декабря 2022 года

Paleogene sand injectites of the Uljanovsk-Syzran Volga region (eastern Russian platform)

Nadezhda Iosifovna AFANAS'EVA*

Svetlana Olegovna ZORINA**

Konstantin Igorevich NIKASHIN***

Nadiya KHAMADA****

Kazan (Volga region) Federal University, Kazan, Russia

Abstract

Relevance of the work. The Paleogene quartz sandstones of the Sosnov Formation that occurred in the Ulyanovsk-Syzran Volga region are known as a valuable source of glass raw materials being considered a scarce raw material of federal significance. But, predicting new deposits based on ideas of the coastal-marine origin of the Sosnov sands exhausted possibilities.

The purpose of the work. The main aim of the work is to consider the Sosnov Formation is a complex of sand intrusions. The second one is to determine the possibility of improving the accuracy of forecasting new objects of sand raw materials.

Methods. 35 sand samples from the Sosnov and the Bathonian Lukojanov Formation are analyzed using the inductively coupled plasma mass spectrometry and X-ray fluorescence analysis. The 3D-model of the Sosnov strata is constructed.

Results. The Sosnov Formation is shown as a complex of sand injectites. The element geochemical study of the Sosnov and the Bathonian Lukojanov sands reveals a high possibility of their genetic similarity. The tectonic trigger of injectite formation is determined. The 3D-model of the Sosnov Formation constructed demonstrates the lateral and vertical variability of the sand deposit morphology.

Conclusions. The geochemical study of the Sosnov and Lukojanov sands reveals the latter could be considered a possible source layer due to the genetic similarity of both strata. The tectonic trigger for the formation of sand intrusions was, most likely, the Late Paleocene activation of the Zhigulevskii fault. 3D-modeling of a particular sand deposit could improve the accuracy of predictive constructions.

Keywords: quartz sands, sandstones, glass raw materials, Sosnov Formation, Paleocene, geochemistry, 3D-modeling, Uljanovsk-Syzran Volga Region, Russian Platform.

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


REFERENCES

- 2018, Strategy for the development of the mineral resource base of the Russian Federation until 2035. Order of the Government of the Russian Federation of December 22, 2018 No. 2914-r. Ministry of Natural Resources and ecology. <http://government.ru/docs/35247/> (In Russ.)
- Biryulev G. N., Tokhtashev V. S., Efremov A. N., Kandaurov P. M. 2012, The state and prospects of mineral raw materials for glass industry. *Prospect and protection of mineral resources*, no. 5, pp. 20–24. (In Russ.)
- Biryulev G. N. 2015, Mineral resource base of glass raw materials in the Russian Federation: state, use, development prospects. *Georesursy* [Georesources], no. 4, issue 63, pp. 21–24. (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.18599/grs.63.4.3>
- State and characteristics of the resource base of hydrocarbons and solid minerals in the Volga Federal District as of 01.01.2018. (In Russ.) <https://pfo.rosnedra.gov.ru/page/150.html?mm=511&ml=414>
- 2004, Minerageny of the sedimentary rocks of the Eastern Russian platform. U. G. Distanov [et al.]. Kazan, 352 p. (In Russ.)
- Akhmet'ev M. A., Shik S. M., Alekseev A. S. (eds.) 2015, Unified stratigraphic scheme of Paleogene deposits of the Volga-Caspian subregion. Moscow, 96 p. (In Russ.)
- Zorina S. O., Afanasyeva N. I. 2012, The sand injectites in the Russian Platform's Paleogene sediments. *Stratigraphy and Sedimentology of Oil-Gas Basins*, vol. 2, pp. 35–48.


✉ n-afanasieva@rambler.ru

 <http://orcid.org/0000-0003-4335-9251>

**svzorina@yandex.ru

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

***kostya97@inbox.ru

 <http://orcid.org/0000-0002-4749-9895>

****nadia.m.hamada@gmail.com

 <http://orcid.org/0000-0003-3269-6842>

8. Distanov U. G., Gimadeev R. A. 1968, Paleogene sandstones of the Ulyanovsk Volga region, mineral composition and properties. Stratigraphy, paleogeography and minerals of the Cenozoic of the Middle Volga region. Kazan: Proceedings of the Geological Institute, vol. 19, pp. 156–168. (*In Russ.*)
9. Muravjev V. I., Tsekhovskiy Yu. G., Kaleda K. G., Babushkin D. A., Suvorov A. I. 1997, Silicification processes in the Paleogene sandstones of the Eastern European Platform. *Lithologia i poleznye iskopajemye*, vol. 2, pp. 150–162. (*In Russ.*)
10. Scotese C. R., 2014, The PALEOMAP Project PaleoAtlas for ArcGIS, Version 2, Vol. 1. Cenozoic Plate Tectonic, Paleogeographic, and Paleoclimatic Reconstructions. Maps 1–15. PALEOMAP Project. Evanston, IL.
11. 1967, Atlas of Lithologic-Paleogeographic Maps of the Soviet Union. A. P. Vinogradov (ed.). Vol. 4: Paleogene, Neogene, and Quaternary. Moscow, 55 maps. (*In Russ.*)
12. Gorbatkina T. E., Iosifova Yu. I. 2004, New Paleogene stratigraphic units of the Voronezh Antecline – Vorobievskaya and Pasekovskaya Formations. *Vestnik Voronezh State University. Geological Series*, vol. 2, pp. 28–44. (*In Russ.*)
13. Zorina S. O., Afanasieva N. I., Khairtdinova L. R. 2018, An Event-Based Depositional Model for the Paleocene-Eocene Sandy–Clayey–Siliceous Sequence of the Russian Platform. *Doklady Earth Sciences*, vol. 480, no. 1, pp. 60–63. <http://doi.org/10.7868/S0869565218130121>
14. 2011, Geological Dictionary. In 3 vol. O. V. Petrov (ed.). St. Petersburg, vol. 2, 476 p. (*In Russ.*)
15. 2021, Subsurface sand remobilization and injection. S. Silcock, M. Huuse, M. Bowman, A. Hurst, S. Cobain (eds). London: The Geological Society, no. 493, 310 p. <https://doi.org/10.1144/SP493>
16. Madon M. 2020, Sand injectites in the West Crocker Formation, Kota Kinabalu, Sabah. *Bulletin of the Geological Society of Malaysia*, vol. 69, pp. 11–26. <https://doi.org/10.7186/bgsm69202002>
17. Ross J. A., Peakall J., Keevil G. M. 2011, An integrated model of extrusive sand injectites in cohesionless sediments. *Sedimentology*, vol. 58, issue 7, pp. 1693–1715. <http://doi.org/10.1111/j.1365-3091.2011.01230.x>
18. Monnier D., Gay A., Imbert P., Cavailhes T., Soliva R., Lopez M. 2015, Sand injectites network as a marker of the palaeo-stress field, the structural framework and the distance to the sand source: Example in the Vocontian Basin, SE France. *Journal of Structural Geology*, vol. 79, pp. 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2015.07.001>
19. Bhatia M. R., Crook K. A. W. 1986, Trace element characteristics of greywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, vol. 92, pp. 181–193. <https://doi.org/10.1007/BF00375292>
20. Floyd P. A., Leveridge B. E. 1987, Tectonic environment of the Devonian Gramscatho basin, south Cornwall: framework mode and geochemical evidence from turbiditic sandstones. *Journal of the Geological Society*, vol. 144, pp. 531–542. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.144.4.0531>
21. Bhatia M. R. 1983, Plate tectonics and geochemical composition of sandstones. *The Journal of Geology*, vol. 91, no. 6, pp. 611–627. <http://dx.doi.org/10.1086/628815>
22. Kuznetsov B. G. 2000, Some features of the development of the Caspian depression. A. N. Dmitrievskiy (ed.). The fundamental basis of new technologies in the oil and gas industry. Moscow, pp. 81–90. (*In Russ.*)
23. Davletshin K. A., Kosov S. A., Doronina A. P. et al. 2017, State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1 : 200,000. Srednevolzhskaya series. Sheet N-39-XXV (Syzran). Explanatory note. Moscow, 92 c. Ministry of Natural Resources of Russia, State Enterprise “Volgageologiya”. (*In Russ.*) URL: <http://geo.mfvsegei.ru/200k/n-39/n-39-25/index.html>
24. Nikitin V. N., Burnaev V. S., Zhukova G. A. et al. 2013, State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1 : 200,000. Srednevolzhskaya series. Sheet N-38-XXX (Novospasskoye). Explanatory note. Moscow. (*In Russ.*) URL: <http://geo.mfvsegei.ru/200k/n-38/n-38-30/index.html>
25. Zhukova G. A., Turova A. V., Karimova Kh. Kh. et al. 2013, State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1 : 200,000. Srednevolzhskaya series. Sheet N-38-XVIII (Maina). An explanatory note. Moscow, 151 p. (*In Russ.*) URL: <http://geo.mfvsegei.ru/200k/n-38/n-38-18/index.html>

The article was received on December 26, 2022

Применение линеаментно-геодинамического анализа для оценки карстоопасности на примере трассы нефтепровода Чайнда–ВСТО

Дмитрий Андреевич НЕЧАЕВ^{1,2*}

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

²Чаяндинское нефтегазопромывловое управление ООО «Газпром добыча Ноябрьск», Ноябрьск, Ямало-Ненецкий автономный округ, Россия

Аннотация

Актуальность работы обусловлена необходимостью усовершенствования методов мониторинга инженерных сооружений транспорта нефти и газа в малонаселенных и труднодоступных регионах. Для обеспечения поддержания безопасной эксплуатации трубопроводных систем предлагается использовать данные дистанционного зондирования местности для установления как пространственного положения объекта, так и центров активации нежелательных экзогенных геологических процессов (карст, солифлюкция, оползневые процессы и т. д.). В качестве основного фактора, влияющего на активацию таких процессов, однозначно стоит отметить тектонические нарушения территории. Исследования, направленные на поиск и построение особых тектонических структур (линеаментов), являются на сегодняшний день важным аналитическим методом поиска взаимосвязей между геодинамикой территории и различными экзогенными процессами.

Цель работы – идентификация линеаментов и составление общей картины тектонической активности по трассе нефтепровода для оценки влияния геодинамики на активацию карстовых процессов.

Методы исследования. Основной акцент уделяется построению и извлечению линеаментов из цифровой модели рельефа посредством применения инструментов программ PCI Geomatica и ArcGis с их последующей верификацией. Помимо построения и описания линеаментов, в работе представлены методические подходы по оценке взаимосвязи параметров тектонической трещиноватости и карстопроявлений посредством статистической обработки плотности их распределения по трассе нефтепровода.

Результаты. В статье представлены результаты влияния тектоники на карстопроявления в пределах трассы нефтепровода, расположенного в сложных геологических и геокриологических условиях в районах южной Якутии. Разработаны подробные карты тектонической активности и распространения линеаментов на изучаемой территории, составленные на основе инженерно-геологических материалов и дешифрирования цифровых моделей рельефа (космоснимков). Полученные результаты распределения плотности общей тектонической трещиноватости показали тесную связь с ранее обнаруженными карстовыми проявлениями в пределах трассы.

Выводы. Применение комплексного подхода к рассмотрению геодинамической активности позволяет усовершенствовать подходы к описанию и изучению сложных по структурно-геологическим параметрам территорий. Линеаментно-геодинамический анализ доказывает необходимость рассмотрения тектонической трещиноватости как основного фактора, влияющего на активацию карста.

Ключевые слова: нефтепровод, карст, линеаменты, тектоника, космические снимки, цифровая модель рельефа.

Введение

При проведении инженерно-геологических исследований территорий, подверженных процессу карстообразования, изучению геодинамической активности следует уделять особое внимание [1–3]. Тектоническая обстановка территории позволяет определить зоны повышенной трещиноватости, а следовательно, наиболее подверженные карстообразованию зоны в связи с активацией движения потоков подземных вод, что, в свою очередь, является одним из основных критериев возникновения карстовых провалов различной конфигурации [4, 5].

Для Республики Саха (Якутия), в особенности ее южных территорий, освоение которых в настоящее время находится в самой активной стадии, учитывая расположение на данных территориях стратегически важных объектов транспорта нефти и газа (к примеру, магистральный нефтепровод Восточная Сибирь–Тихий океан, далее –

ВСТО, магистральный газопровод «Сила Сибири» и др.), проблема изучения геоструктурных факторов, способных привести к активации карстовых процессов, особенно актуальна [2, 5, 6]. Эксплуатация трубопроводных систем, как промысловых, так и магистральных, трассы которых пролегают на территориях, подверженных карсту, предполагает проведение постоянного мониторинга состояния трубопроводов для обеспечения их надежной работы.

Выявление закономерностей влияния тектонических нарушений на активацию и развитие карстовых процессов в пределах трассы нефтепровода Чайнда–ВСТО, расположенного на территории Чаяндинского нефтегазоконденсатного месторождения (далее – ЧНГКМ) Ленского улуса Республики Саха (Якутия), является целью представленного исследования.

В настоящее время проведено множество исследова-

✉nechaevdmityrf@gmail.com;

nechaev.da@noyabrsk-dobycha.gazprom.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-1254-6858>

ний, посвященных изучению тектонических нарушений тех или иных территорий, где в качестве определяющего критерия оценки геодинамической активности выступают линеаменты – прямолинейные элементы рельефа местности, образованные границами хребтов, кряжей, участками речных долин, береговыми линиями, цепочками провалов рельефа, эрозионными процессами, которые представляют современные тектонические нарушения осадочного чехла горных пород изучаемой территории [2, 7–12]. Для вычисления линеаментов используются цифровые модели рельефа (ЦМР), которые извлекаются из оптических и радиолокационных данных дистанционного зондирования с применением различных автоматизированных процессов [2, 9, 10, 13].

Однако для определения точности автоматического процесса необходима их верификация посредством применения традиционных геолого-геофизических методов и сопоставления полученных результатов с апробированными материалами, содержащими информацию о глубинных тектонических нарушениях. Комплексный подход к рассмотрению тектонической трещиноватости с использованием как картографического материала, так и цифровых моделей позволит получить исчерпывающую информацию о геодинамической активности на исследуемой территории.

Структурно-тектонические условия трассы нефтепровода. Трасса нефтепровода располагается в южной

части Сибирской платформы, в основном в пределах Непско-Ботуобинской антеклизы – в восточной части Непского свода. Формирование Непско-Ботуобинской антеклизы связано с развитием Ангаро-Ленского прогиба, который в конце силура был охвачен интенсивной складчатостью. Территория характеризуется наличием ярко выраженных линейных складок, представленных в основном возвышенными участками (грядами и увалами) [14, 15]. Грядовой рельеф территории образовался в результате выведения на дневную поверхность антиклиналей в связи с репарацией линейных структур Ангаро-Ленского краевого прогиба при их денудации. Стоит учесть, что близость р. Лены как основного базиса эрозии представленной территории и различная плотность слагающих территорию пластов сформировали достаточно расчлененный рельеф, представленный асимметричными долинами рек (врезанными на 100–250 м), отвесными склонами и невыработанным профилем. Движение водотоков основных крупных рек (Лена, Нюя) и их притоков (Чаянда, Хамаакы, Олдон и др.) имеет северо-восточное направление, а сами водотоки дугообразно изгибаются согласно направлению линейных складок. Севернее реки Нюя складки имеют менее выраженный характер и постепенно переходят в холмисто- и плоско-увалистые поверхности. Ориентация направления речной сети территории доказывает, что участки долин водотоков расположены

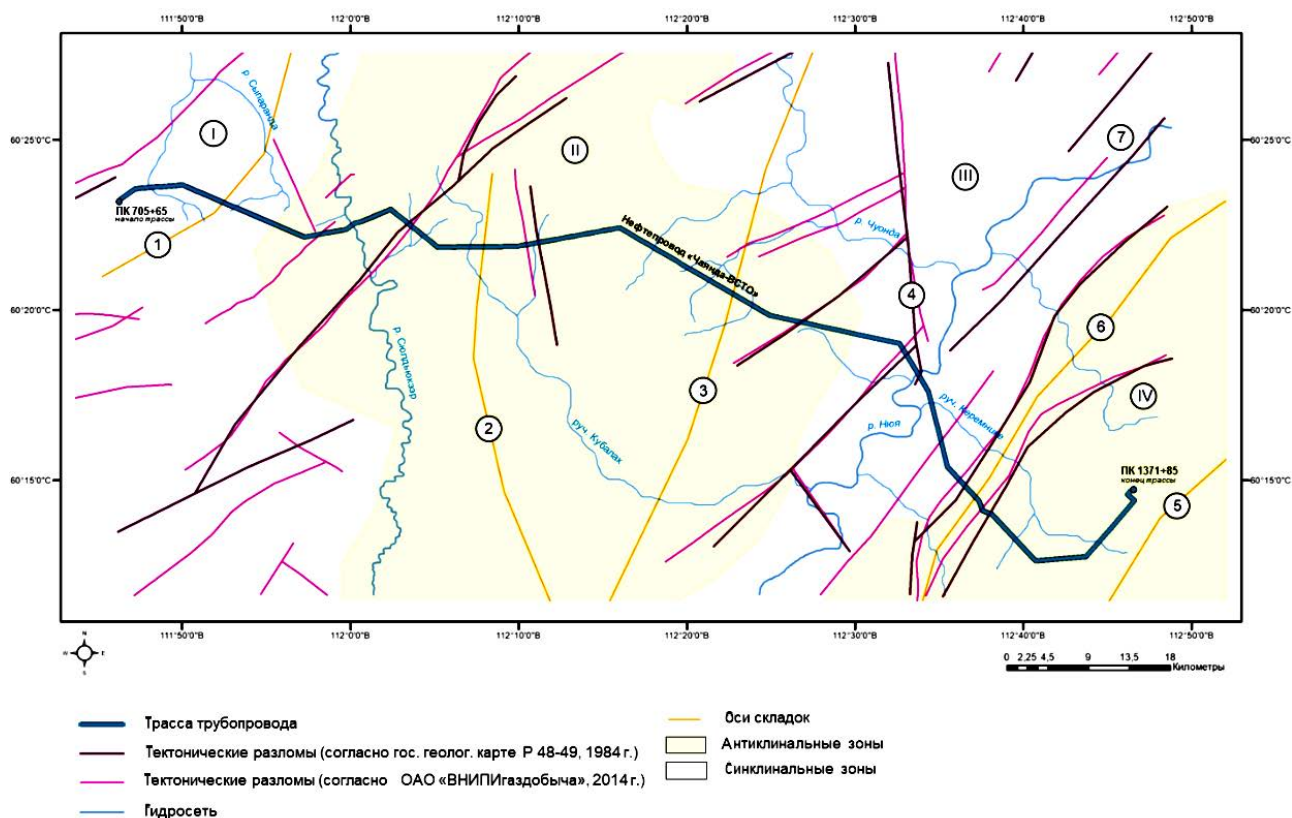


Рисунок 1. Обзорная схема основных тектонических зон (составил Д. А. Нечаев, 2022 г.): I – Верхнечаяндинская зона пологих дислокаций; II – Пеледуй-Олдонская антиклинальная зона; III – Нюйская синклиальная зона; IV – Средненюйская антиклинальная зона; 1 – Кубалахская антиклиналь; 2 – Сюльдзюкярская антиклиналь; 3 – Чаяндинская антиклиналь; 4 – Чаяндинский сброс; 5 – Тас-Уряхская антиклиналь; 6 – Ульяновская антиклиналь; 7 – Нюйский взброс

Figure 1. Overview of the main tectonic zones (compiled by D. A. Nechaev, 2022): I – Verkhnechayandinskaya area of shallow dislocations; II – Peleduy-Oldonskaya anticlinal zone; III – Nyuyskaya synclinal area; IV – Srednenyuyskaya anticlinal zone; 1 – Kubalakhskaya anticline; 2 – Syuldzhyukyarskaya anticline; 3 – Chayandinskaya anticline; 4 – Chayandinskiy fault; 5 – Tas-Uryakhskaya anticline; 6 – Ulyanovskaya anticline; 7 – Nyuyskiy uplift

в зоне обновленных и новейших разрывных нарушений, поднятие которых приурочено к позднеюрскому и плиоцен-четвертичному периодам.

Трасса нефтепровода пересекает следующие основные тектонические зоны: Верхнечаяндинскую зону пологих дислокаций, Пеледуй-Олдонскую антиклинальную зону, Нюйскую синклинальную зону, Средненюйскую антиклинальную зону (рис. 1).

Общим признаком антиклинальных структур Пеледуй-Олдонской зоны является их большая протяженность при незначительной амплитуде поднятия, при которых углы наклона по величине составляют не более 20°. Олдонская зона разломов соседствует с границей Пеледуйского поднятия и представлена большим количеством взбросов и сбросов, ориентированных в субмеридиональном направлении с амплитудой перемещения около 500 м и шириной 15–20 км [16].

На двух участках (а именно в бассейне среднего течения р. Нюй) трасса нефтепровода расположена в пределах Нюйской синклинальной зоны, относящейся к Нюйско-Джербинской впадине, которая, в свою очередь, приурочена к восточным участкам Прибайкальского краевого прогиба. Нюйско-Джербинская впадина ориентирована в северо-восточном направлении, выполнена отложениями нижнего и среднего палеозоя, в которых отложения среднего и верхнего кембрия и нижнего ордовика располагаются горизонтально в центральной части впадины. На юго-западе Нюйско-Джербинская впадина примыкает к Пеледуйскому поднятию, а на юге и востоке ограничена складчатыми структурами Витимо-Патомского нагорья и Уринского антиклинория [14, 15].

Трасса трубопровода проходит также и через Чаяндинский сброс, приуроченный к Нюйской синклинальной зоне. Далее трасса нефтепровода пересекает асимметричную по строению Нюйскую впадину, длина которой составляет 260 км, а ширина в самой протяженной части около 170 км [14]. Строение крыльев впадины резко различается, а центральная зона, простирающаяся в юго-восточном направлении к Уринскому антиклинорию, достаточно широкая и имеет ярко выраженные границы. Центральная часть впадины (наиболее прогнутая) выполнена силурскими отложениями. Конец трассы трубопровода находится в пределах Средненюйской антиклинальной зоны, которая располагается на границе водораздела крупных рек региона – Нюй и Пеледуй. Эта антиклинальная зона общей протяженностью 20–30 км представлена полосой антиклинальных складок (гребневидных и валобразных по структуре), которые впоследствии переходят в широкие и пологие синклинальные зоны [15].

На территории выявлены поперечные крутопадающие разрывы субмеридионального простирания, которые в границах Лено-Нюйской равнины приводят к активации оползней и различных форм проявления карста и солифлюкции [14]. Так, С. Ф. Павловым [15] на р. Нюй ниже устья р. Олдон были найдены многочисленные карстовые пещеры, а в верховьях р. Хамра и по всей протяженности ее притока (р. Чар-Маастах) найдены карстовые озера протяженностью до 3 км в длину с карстовыми воронками, по которым вода уходит и осушает русла водотоков. Грядовой рельеф, расчлененность рельефа, наличие раз-

рывных нарушений позволяют сделать вывод о достаточно сложной структурно-тектонической обстановке территории, которая способствует активации множества опасных геологических процессов, в том числе и карста.

Инженерно-геологические особенности проявления карста на территории. Массивное распространение многолетнемерзлых грунтов по территории трассы трубопровода является одним из основных факторов, который в принципе определяет инженерно-геологическую обстановку района исследования. Более 40 % от общей длины трассы нефтепровода подвержено влиянию криолитозоны, при этом начало трассы характеризуется прерывистым распространением многолетнемерзлых грунтов, а конец трассы в основном характеризуется островным их распространением [17].

Повышение среднегодовой температуры и протекающие параллельно процессы деградации многолетнемерзлых грунтов в совокупности с увеличением интенсивности стока поверхностных вод и изменением состава и характера подземных вод, а также нарушение мощности четвертичных отложений и гидрогеологических условий территории трассы являются одними из явных определяющих факторов, которые влияют на активизацию процесса карстообразования на исследуемой территории [18].

Процесс карстообразования непосредственно связан с размывом пород подземными водами и поверхностным стоком в трещиноватые зоны. По трещинам происходит активная циркуляция подземных вод, и, как следствие, – растворение и вынос относительно легкорастворимых минералов. Минеральный состав пород также имеет большое значение [2]. Наиболее растворимы гипсы и ангидриты, известняки обладают средней растворимостью, а доломиты подвержены растворению в меньшей степени [16, 17]. Согласно тому, что по всей трассе трубопровода наблюдается широкое распространение карбонатных пород, карстовые процессы встречаются повсеместно. Поэтому, принимая во внимание наличие карбонатных пород, тектонику и сложный рельеф местности, стоит отметить, что геолого-стратиграфические характеристики территории предрасположены к карстообразованию.

В пределах изученной территории развит как древний, так и современный карст. Около 6,1 % от общей протяженности трассы нефтепровода пролегает в районах с активными карстовыми процессами. В основном закарстованные территории зафиксированы на конце трассы нефтепровода [17]. На основании инженерно-геологических изысканий по обустройству нефтяной оторочки ботубинской залежи Чаяндинского НГКМ, проводимых в 2014 г. [16], определены основные участки активации карстовых процессов по трассе и интерпретированы в цифровую модель нефтепровода в ArcGIS Desktop для их пространственной привязки.

Методика выполнения работ. Для выделения основных элементов линеаментно-геодинамического анализа применялись данные, полученные посредством дешифрирования снимков космического термоэмиссионно отражающего радиометра ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer), отраженные в GDEM (Global Digital Elevation Model) – глобальной цифровой модели рельефа, представленной на сервисе

NASA Earthdata Search, обработка которых проводилась посредством инструментов ArcGIS Desktop в августе–сентябре 2022 г. в отделении геологии НИ ТПУ. Первоначально собранные растровые изображения были интегрированы в единую мозаику сцен (инструмент Raster dataset – Mosaic to new raster в наборе инструментов модуля пространственного анализа Spatial Analyst в программе ArcGIS Desktop). Данная цифровая модель выбрана в связи с однородностью исходного материала и высокой детализацией пространства.

Для выделения в автоматизированном режиме линеаментов в данной работе применяются инструменты программы ГИС Geomatica (PCI Geomatica), которая рекомендовала себя в использовании при проведении геодинамических исследований и обработки различных растровых и векторных изображений рельефа местности. Для определения линеаментов использовался один из модулей программы – LINE: Lineament Extraction, работа которого основана на трех последовательных этапах:

- идентификация границ Кэнни (Canny edge detector), в процессе этого этапа выделяются линейно ориентированные элементы (параметром RADI (Filter Radius) с помощью функции Гаусса) в виде градиентов пикселей растра, близких по значениям абсолютных высот, и выделяются среди этих градиентов максимумы, при этом остальные значения градиента обращаются в нулевые значения;
- пороговая обработка растра, определяемая параметром GTHR (Порог пограничного градиента), при котором каждый выбранный пиксель конвертируется в элемент края границы для получения двоичного изображения;
- извлечение границ линеаментов, кривые извлекаются из изображения двоичного края.

Алгоритм извлекает из двоичного изображения кривые шириной в один пиксель, и формируется выборка из

последовательных элементов. Кривые из этих элементов с количеством пикселей, меньшим значения параметра LTHR (Curve Length Threshold), исключаются из дальнейшей обработки, а оставшиеся кривые преобразуются в вектор. Результирующие полилинии представляют собой подобие исходных пиксельных кривых, где погрешность расстояния между ними задается параметром FTNR (Line Fitting Threshold). Алгоритм программы связывает между собой полилинии, концевые сегменты которых обращены друг к другу и имеют достаточно малое расстояние для привязки, а также одинаковую угловую ориентацию. Конечные полилинии (готовые линеаменты), составленные из кривых, сохраняются в векторном слое.

При применении подготовленных цифровых моделей рельефа с детализацией в районе расположения трассы нефтепровода Чайанда–ВСТО был выделен набор линеаментов для этой территории. Стоит отметить, что на выбранных космоснимках при составлении единой цифровой модели рельефа обнаружили пустоты, которые в последствии смогли внести в результаты исследования некоторые неточности. Поэтому для определения корректности автоматического процесса необходима верификация полученных данных.

Для верификации необходимо иметь в виду основные геоморфологические индикаторы линеаментов, которые позволят выделить данные структуры на исследуемой территории. К таким индикаторам относят денудационные уступы, бровки и перегибы на склонах долин, прямолинейно вытянутые границы водоразделов, эрозионные формы рельефа, прямолинейные отрезки русел и ложбин стоков, резкие изгибы временных и постоянных водотоков. С учетом всех перечисленных геологических признаков линеаментов и использованием набора инструментов модуля пространственного анализа Spatial Analyst в про-

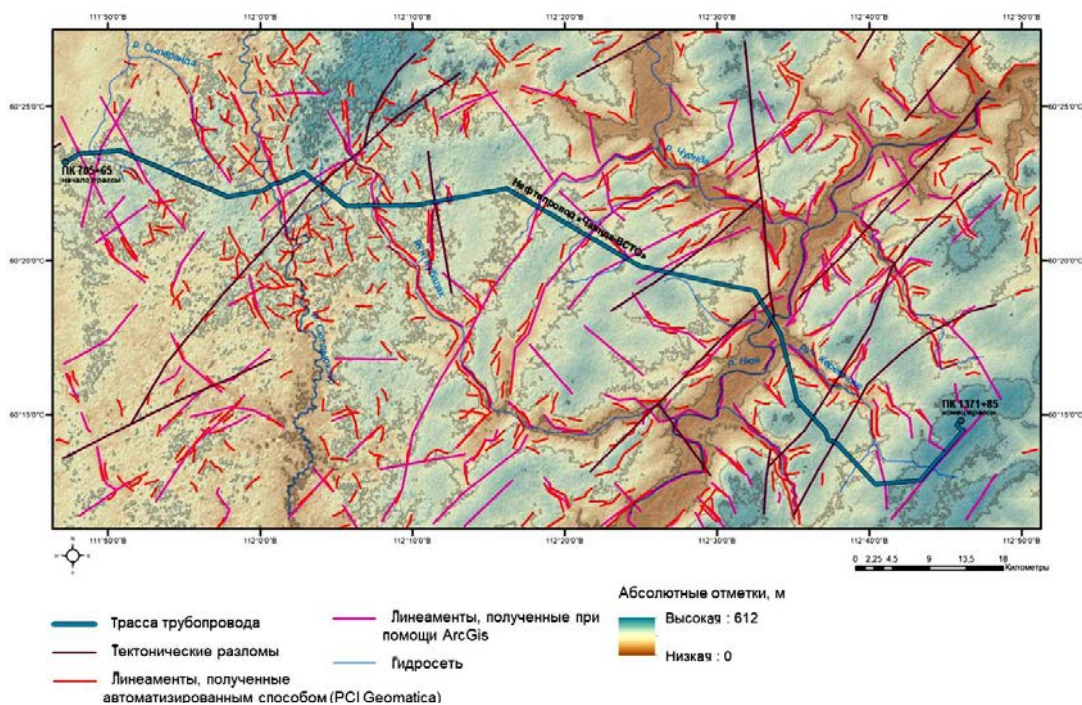


Рисунок 2. Карта основных элементов общей тектонической трещиноватости, выделенных по трассе нефтепровода
 Figure 2. Map of the main elements of general tectonic fracturing identified along the route of the oil pipeline

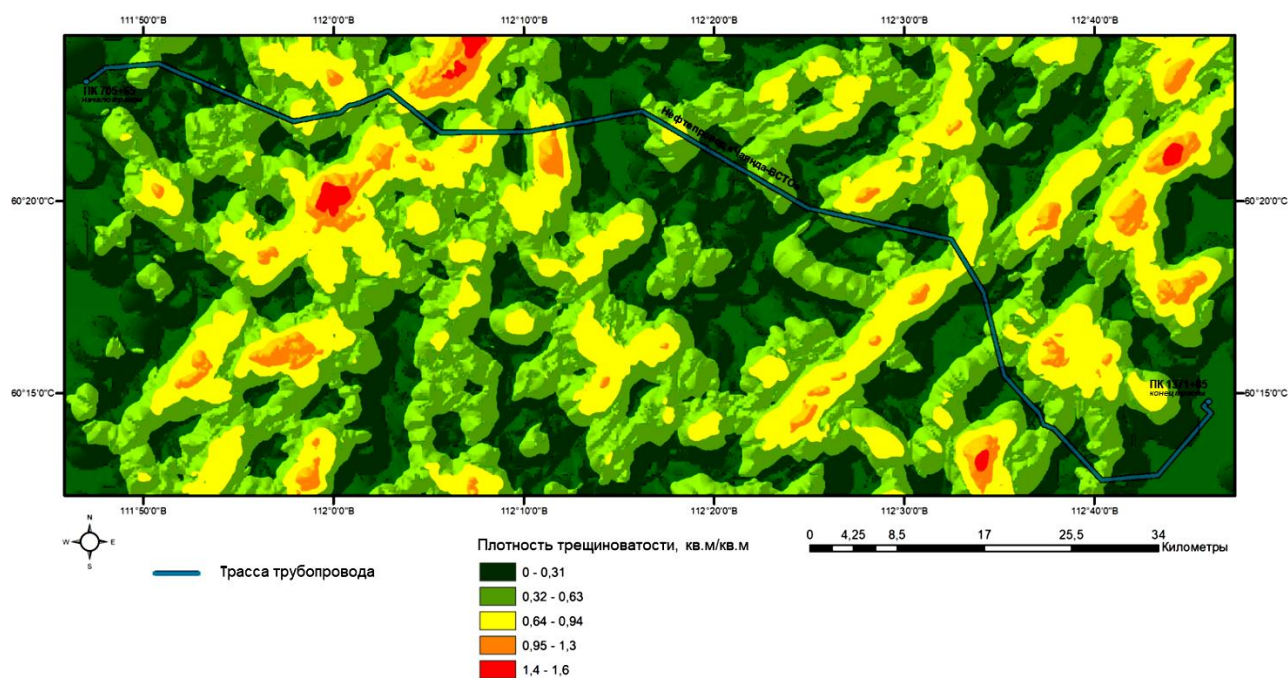


Рисунок 3. Карта плотности общей тектонической трещиноватости по трассе нефтепровода
Figure 3. Density map of the general tectonic fracturing along the oil pipeline route

грамме ArcGIS Desktop применительно к цифровой модели рельефа было проведено структурно-тектоническое дешифрирование космических снимков по идентификации линеаментов исследуемой территории.

С использованием инструмента для обработки растровых изображений Hillshade были созданы отдельные растровые изображения местности с различным азимутом положения источника света (который выражается в положительных градусах – от 0° до 360°, измеряемых по часовой стрелке от направления на север), град: 50, 90, 150, 200, 315. Далее с учетом перечисленных геологических признаков линеаментов разрабатывается векторный слой, в который вносят данные по линейно ориентированным элементам. С использованием моделей рельефа с различным положением источника света производилось последовательное дешифрирование растровых изображений, в результате идентифицируемые линейно ориентированные элементы либо уточнялись (дополнялись новыми кривыми), либо исключались из рассмотрения. В итоге составлена карта линеаментов, которые во многом совпадают с глубинными тектоническими разломами и линеаментами, полученными автоматизированным способом. С учетом всех выделенных тектонических нарушений (разломы, линеаменты) разработана карта общей тектонической трещиноватости (рис. 2).

Используя результаты построений, можно утверждать, что линеаменты, выделенные автоматизированно или же идентифицированные вручную с использованием цифровых моделей рельефа, совпадают или же расположены и ориентированы в непосредственной близости с направлениями глубинных тектонических разломов, выделенных геолого-геофизическими методами, что говорит о высокой точности построения.

Результаты и их обсуждение

По результатам аэрокосмогеологических исследований по определению параметров общей тектонической трещиноватости с учетом как глубинных разломов, полученных геолого-геофизическими методами, так и идентифицированных линеаментов с детализацией в районе трассы нефтепровода Чайнда–ВСТО построена карта плотности при помощи модуля программы ArcGIS с использованием возможностей пространственного анализа данных Spatial Analyst (при помощи инструмента Line Density).

При наложении карты плотности тектонической трещиноватости и карты плотности распространения карста по трассе нефтепровода прослеживается связь между этими параметрами. Для получения численных результатов распределения плотности тех или иных параметров трассы трубопровода была разбита на участки длиной 500 м (всего 136 участков), где для каждого участка выделены численные значения плотности линеаментов, плотности тектонических разломов, плотности карстовых проявлений, а также плотности общей тектонической трещиноватости. Так, по полученным данным явно выделены четыре зоны карстопроявлений (N1–N4), в пределах которых было рассмотрено взаимное влияние всех ранее выявленных параметров (рис. 4).

Для участка N1, на котором уже зафиксированы карстовые воронки при проведении инженерно-геологических изысканий при строительстве [16], обнаружена достаточно высокая плотность линеаментов. Коэффициент корреляции k численных данных плотности карста и плотности линеаментов ($k = 0,2$) показывает возможную их связь, однако для данного участка в дальнейшем необходимо определить дополнительные факторы, которые напрямую приводят к активации карста на рассматриваемом участке.

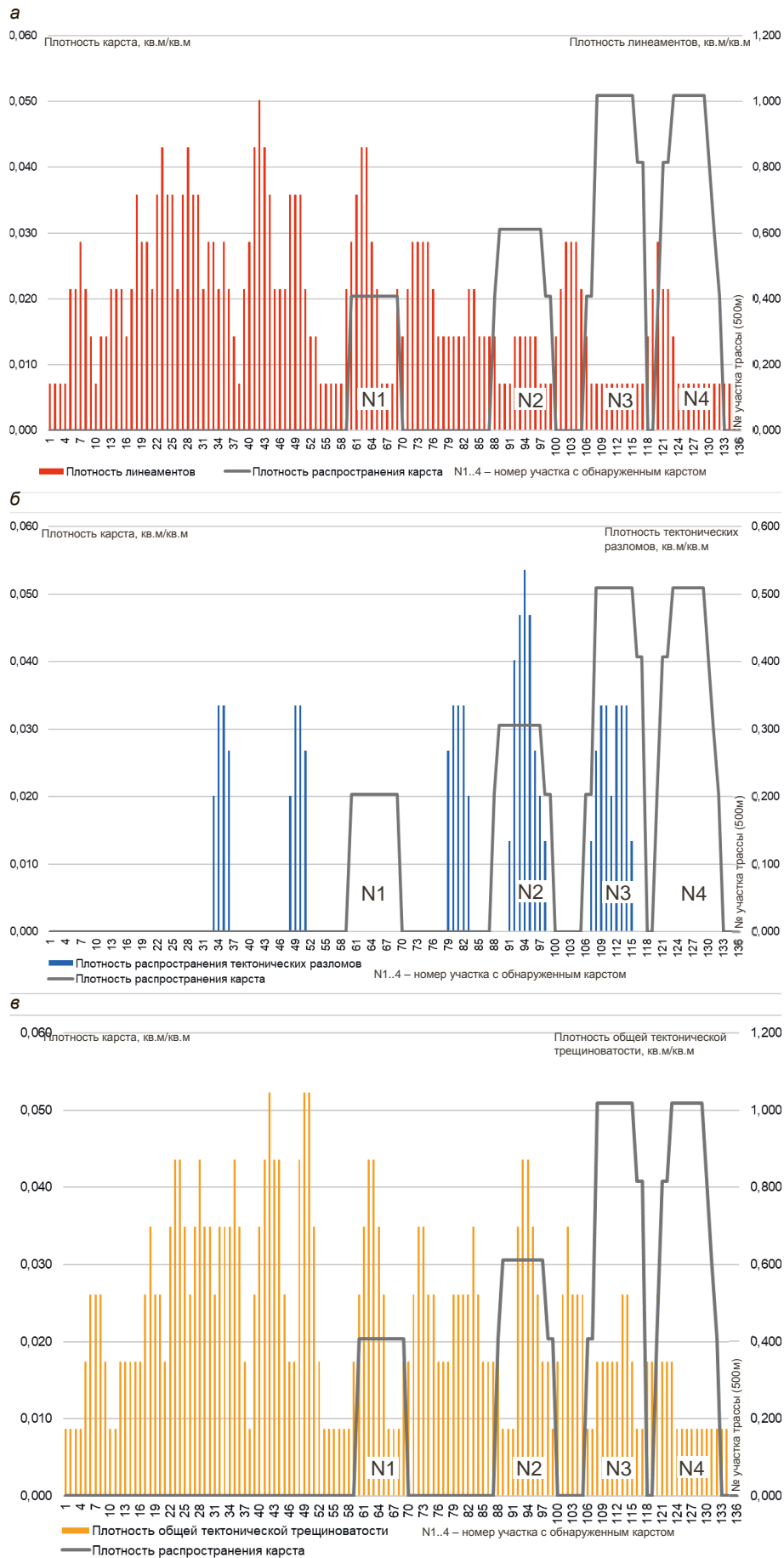


Рисунок 4. Графики взаимосвязи плотности линейментов (а), плотности распространения тектонических разломов (б), плотности общей тектонической трещиноватости (в) и плотности распространения карста по трассе трубопровода
Figure 4. Graphs of the interdependence of the density of lineaments (a), the distribution of tectonic faults (b), the increase in the total tectonic fracturing (c) and the distribution of karst along the pipeline route

На участок N2 явное влияние оказывает тектонический разлом, который в принципе и образует рельеф местности – на данном участке трасса нефтепровода пересекает водоток (р. Нюя), а сам участок находится непосредственно в Нюйской синклинали зоне, ограниченной Чаяндинским сбросом с одной стороны и Нюйским взбросом с другой (рис. 1). Фокусируясь на идентифицированные в пределах этого участка линеаменты, обращаем внимание на увеличение показателя их плотности. Коэффициенты корреляции общей тектонической трещиноватости и плотности карста показывают возможную, хоть и слабую, взаимосвязь параметров ($k = 0,3$), однако стоит отметить, что наличие тектонических разломов, возможно, оказывает большее влияние на карст в пределах выделенного участка, нежели линеаменты.

Наиболее обширные территории, подверженные карсту, располагаются в пределах участков N3 и N4. Для первого из этих участков N3, если исходить из анализа гистограмм, очевидно влияние проходящего по данному участку глубинного тектонического разлома. Для второго участка N4 визуально выделяется зависимость от линеаментов, однако и она выражена достаточно слабо ($k = -0,2$), что говорит о необходимости исследования других параметров помимо геодинамической активности на данном участке, которые активизируют уже подтвержденные карстовые формы.

По совмещенному графику (рис. 4, в) распределения плотности общей тектонической трещиноватости и плотности распределения карстовых процессов однозначно подтверждается взаимосвязь исследуемых процессов, что свидетельствует о влиянии тектонических нарушений и современной геодинамики района на активацию карстовых процессов в условиях трассы нефтепровода. В целом необходимо отметить, что, несмотря на среднюю связь коэффициентов корреляции исследуемых параметров, учитывать влияние тектонической трещиноватости при комплексной оценке активации карста или же других опасных экзогенных процессов необходимо.

Также стоит отметить высокую геодинамическую активность, зафиксированную на начальных участках трассы, которая в основном представлена линеаментами в результате геодинамических исследований космических снимков рельефа местности. В пределах данного участка ранее не обнаружены явные проявления карстовых процессов, однако стоит отметить наличие на данном участке достаточно густой сети водотоков (река Сьюльдюкээр, ручьи Чуонда, Куччугуй-Утянях, Кубалах и др.), наличие эрозионных и заболоченных участков. На отдельных участках в начале трассы трубопровода зафиксированы экстремумы плотности линеаментов и наличие глубинных тектонических разломов. Данный участок потенциально предрасположен к образованию морозных бугров

пучения [16], поэтому данный факт не исключает влияния тектонической трещиноватости на активацию и других опасных экзогенных геологических процессов помимо карста, что также будет учитываться и при дальнейших исследованиях.

Выводы

1. Составлены подробные карты общей тектонической трещиноватости для территории трассы нефтепровода Чаянда–ВСТО, учитывающие как ранее зафиксированные глубинные разломы [14, 15], современные тектонические разломы, уточненные и выявленные при инженерно-геологических изысканиях [16], так и сеть линеаментов, полученную при проведении данного исследования.

2. Разработанные цифровые модели трассы трубопровода с идентифицированными участками проявления опасных карстовых процессов позволили провести численный анализ взаимосвязи плотности линеаментов и глубинных тектонических разломов с показателями плотности распространения карста в пределах трассы трубопровода. В итоге подтверждено влияние тектонической трещиноватости на развитие карста. Представленные методические подходы по идентификации линеаментов, извлечению численных данных и их последующей обработке можно применять в дальнейшем для оценки других параметров и их влияния на активацию экзогенных процессов.

3. В общем, повышение плотности общей тектонической трещиноватости, учитывая плотность распространения линеаментов, сопровождается одновременным возрастанием интенсивности активации опасных геологических процессов. Полученные результаты распределения плотности геодинамической активности по трассе нефтепровода позволят в дальнейшем определить участки, на которых возможна активация и других экзогенных процессов помимо карста.

Заключение

Таким образом, наличие геодинамической активности на закарстованных участках местности следует учитывать как при инженерно-изыскательских и проектно-строительных работах, так и непосредственно при эксплуатации объектов. Результаты, представленные в данной статье, позволят в дальнейшем учесть влияние тектонических разломов, трещиноватости и линеаментов при оценке карстоопасности для трубопроводов транспорта нефти и газа, расположенных как в районах южной Якутии, так и в других регионах со сложной инженерно-геологической обстановкой территории. Используемые методические подходы могут быть применены для исследования геодинамики территории на активацию опасных экзогенных геологических процессов в пределах трасс линейных объектов различного назначения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Копылов И. С. Линеаментно-геодинамический анализ на закарстованных территориях Нижегородской области // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2016. № 7-2. С. 241–246.
2. Строкова Л. А., Ежкова А. В., Леонова А. В. Применение линеаментного анализа для оценки карстоопасности при проектировании магистрального газопровода в южной Якутии // Известия ТПУ. Инжиниринг георесурсов. 2020. Т. 331. № 11. С. 117–126. <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/11/2891>
3. Дробинина Е. В., Щербаков С. В., Золотарев Д. Р., Ковин О. Н., Федоров Г. В., Инкин Д. А. Оценка карстовой опасности с применением геофизических методов в условиях складчатой зоны (на примере окрестностей г. Кентау, Казахстан) // Известия УГГУ. 2022. Вып. 1 (65). С. 28–45. <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2022-1-28-45>

4. Копылов И. С. Методология и принципы оценки геодинамической активности // Международный журнал экспериментального образования. 2015. № 8-3. С. 406–407.
5. Санкло М. М. Аэрокосмические методы исследований при поисках подземных вод в Якутии // Аэрокосмические методы в геологии. 2019. С. 246–252.
6. Ситников В. С., Спектор В. Б. Новейшая тектоника нефтегазоносных территорий на юго-западе Якутии // Тихоокеанская геология. 2004. Т. 23. № 6. С. 45–54.
7. Копылов И. С., Порозков К. С. Инженерно-аэрокосмический анализ территории трассы нефтепровода Куюмба–Тайшет // Аэрокосмические методы в геологии. Пермь, 2019. С. 228–238.
8. Abd El-Wahed M., Zoheir B., Pour A. B., Kamh S. Shear-related gold ores in the Wadi Hodein Shear Belt, South Eastern Desert of Egypt: Analysis of Remote Sensing, Field and Structural Data // Minerals. 2021. Vol. 11. No. 5. P. 1–36. <http://doi.org/10.3390/min11050474>
9. Heriawan M. N., Ali Syafi'i A., Saepuloh A., Kubo T., Koike K. Detection of Near-Surface Permeable Zones Based on Spatial Correlation Between Radon Gas Concentration and DTM-Derived Lineament Density // Natural Resources Research. 2021. Vol. 30. No. 4. P. 2989–3015. <http://doi.org/10.1007/s11053-020-09718-z>
10. Prabhakaran A., Raj N. J. Mapping and analysis of tectonic lineaments of Pachamalai hills, Tamil Nadu, India using geospatial technology // Geology, Ecology, and Landscapes. 2018. Vol. 2. No. 2. P. 81–103. <http://doi.org/10.1080/24749508.2018.1452481>
11. Ranjbari M. R., Vagheei R., Salehi H. Integration of Landsat-8 and Sentinel-1 dataset to extract geological lineaments in complex formations of Tepal mountain area, Shahrood, North Iran // Advances in Space Research. 2023. Vol. 71. Issue 1. P. 936–945. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.08.061>
12. Zoheir B., Abd El-Wahed M., Pour A. B., Abdelnasser A. Orogenic Gold in Transpression and Transtension Zones: Field and Remote Sensing Studies of the Barramiya–Mueilha Sector, Egypt // Remote Sensing. 2019. Vol. 11. Issue 18. P. 1–33. <http://dx.doi.org/10.3390/rs11182122>
13. Колобова Н. С., Писецкий В. Б. Методики и технологии дистанционного зондирования Земли с целью оценки параметров тектонических процессов // CERES. 2010. Т. 275. № 500. С. 1000.
14. Блажкун Д. В., Ивашина Е. И. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200 000. Сер. Верхневелиюльская. Листы Р-49-XXXIII (р. Тымпычан), Р-49-XXXIV (Хамаакы), О-49-III (Терешкино): объяснит. записка. М., 1998. 78 с.
15. Дукарт Ю. А. Геологическая карта СССР. Масштаб 1:200 000. Сер. Верхневелиюльская. Лист Р-49-XXX: объяснит. записка. М., 1978. 70 с.
16. Обустройство нефтяной оторочки ботубинской залежи Чайядинского НГКМ с выделением этапа опытно-промышленных работ: техн. отчет по инженерным изысканиям. Этап 3. Строительство нефтепровода Чайянда–ВСТО. В 5 т. Т. 2.1 (ч. 2). Саратов: ОАО «ВНИПИгаздобыча», 2014. 412 с.
17. Строкова Л. А., Нечаев Д. А. Роль опасных геологических процессов при эксплуатации нефтепровода «Чаянда–ВСТО» // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. 2022. Т. 333. № 9. С. 86–98. <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/9/3752>
18. Stroková L. A. Recognition of geological processes in permafrost conditions // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 2019. Vol. 78. No. 8. P. 5517–5530. <https://doi.org/10.1007/s10064-019-01511-4>

Статья поступила в редакцию 02 декабря 2022 года

Application of lineament-geodynamic analysis for assessment of karst hazard on the example of the Chayanda–ESPO oil pipeline route

Dmitriy Andreevich NECHAEV^{1,2*}

¹The National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

²Chayandinsk oil and gas department of the LLC “Gazprom dobycha Noyabr’sk”, Noyabr’sk, Yamalo-Nenets Autonomous Okrug, Russia

Abstract

The relevance of the work is due to the need to improve the methods for monitoring engineering structures of oil and gas transport in sparsely populated and hard-to-reach regions. To ensure the safe operation of pipeline systems, it is proposed to use remote sensing data to establish both the spatial position of the object and the activation centers of undesirable geological processes (karst, solifluction, landslide processes, etc.). As the main factor influencing the activation of such processes, it is definitely worth noting the tectonic disturbances of the territory. The research aimed at detecting and extracting special tectonic structures – lineaments – is today an important analytical method for finding relationships between the geodynamics of a territory and various geological processes.

Purpose of the work – identification of lineaments and compilation of a general picture of tectonic activity along the pipeline route to assess their impact on the activation of karst sinkholes.

Research methods. The main focus is on the construction and extraction of lineaments from a digital elevation model using the tools of the PCI Geomatica and ArcGis programs with their subsequent verification. In addition to construction, visual and analytical numerical data are presented to determine the relationship between the parameters of tectonic fracturing and karst manifestations.

Results. The article presents the results of the influence of tectonics on karst manifestations within the route of an oil pipeline located in difficult engineering-geological and cryological conditions in southern Yakutia. Detailed maps of tectonic activity and distribution of lineaments in the study area have been developed, compiled on the basis of engineering-geological materials and decoding of digital elevation models (satellite images). The obtained results of the density of the general tectonic jointing showed a close connection with the previously discovered karst manifestations within the route.

Conclusions. The application of an integrated approach to the consideration of geodynamic activity makes it possible to improve approaches to the description and study of territories that are complex in terms of engineering and geological parameters. Lineament-geodynamic analysis proves the need to consider tectonic fracturing as the main factor influencing karst activation.


Keywords: Oil pipeline, karst, lineaments, tectonics, satellite imagery, digital elevation model.

REFERENCES

1. Kopylov I. S. 2016, Lineament-geodynamic analysis in the karst territories of the Nizhny Novgorod region. *International Journal of Applied and Fundamental Research*, no. 7-2, pp. 241–246. (In Russ.)
2. Strokova L. A., Ezhkova A. V., Leonova A. V. 2020, Application of lineament analysis to assess the karst hazard in the design of the main gas pipeline in south Yakutia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Engineering of georesources*, vol. 331, no. 11, pp. 117–126. <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/11/2891> (In Russ.)
3. Drobinina E. V., Shcherbakov S. V., Zolotarev D. R., Kovin O. N., Fedorov G. V., Inkin D. A. 2022, Assessment of karst hazard using geophysical methods in the conditions of a folded zone (on the example of the environs of Kentau, Kazakhstan). *Izvestiya USGU*. Issue. 1 (65), pp. 28–45. <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2022-1-28-45> (In Russ.)
4. Kopylov I. S. 2015, Methodology and principles for assessing geodynamic activity. *International Journal of Experimental Education*, no. 8-3, pp. 406–407. (In Russ.)
5. Sanklo M. M. 2019, Aerospace research methods in the search for groundwater in Yakutia. *Aerospace methods in geology*, pp. 246–252.
6. Sitnikov V. S., Spektor V. B. 2004, Recent tectonics of oil and gas bearing territories in the southwest of Yakutia. *Tikhookeanskaya Geologiya*, vol. 23, no. 6, pp. 45–54. (In Russ.)
7. Kopylov I. S., Porozkov K. S. 2019, Engineering and aerospace analysis of the territory of the Kuyumba–Taishet oil pipeline route. *Aerospace methods in geology*. Perm, pp. 228–238. (In Russ.)
8. Abd El-Wahed M., Zoheir B., Pour A. B., Kamh S. 2021, Shear-related gold ores in the Wadi Hodein Shear Belt, South Eastern Desert of Egypt: Analysis of Remote Sensing, Field and Structural Data. *Minerals*, vol. 11, no. 5, pp. 1–36. <http://doi.org/10.3390/min11050474>
9. Heriawan M. N., Ali Syafi’i A., Saepuloh A., Kubo T., Koike K. 2021, Detection of Near-Surface Permeable Zones Based on Spatial Correlation Between Radon Gas Concentration and DTM-Derived Lineament Density. *Natural Resources Research*, vol. 30, no. 4, pp. 2989–3015. <http://doi.org/10.1007/s11053-020-09718-z>
10. Prabhakaran A., Raj N. J. 2018, Mapping and analysis of tectonic lineaments of Pachamalai hills, Tamil Nadu, India using geospatial technology. *Geology, Ecology, and Landscapes*, vol. 2, no. 2, pp. 81–103. <http://doi.org/10.1080/24749508.2018.1452481>

✉nechaevdmitryrf@gmail.com;

nechaev.da@noyabrsk-dobycha.gazprom.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-1254-6858>

11. Ranjbari M. R., Vagheei R., Salehi H. 2023, Integration of Landsat-8 and Sentinel-1 dataset to extract geological lineaments in complex formations of Tepal mountain area, Shahrood, North Iran. *Advances in Space Research*, vol. 71, issue 1, pp. 936–945. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.08.061>
12. Zoheir B., Abd El-Wahed M., Pour A. B., Abdelnasser A. 2019, Orogenic Gold in Transpression and Transtension Zones: Field and Remote Sensing Studies of the Barramiya–Mueilha Sector, Egypt. *Remote Sensing*, vol. 11, issue 18, pp. 1–33. <http://dx.doi.org/10.3390/rs11182122>
13. Kolobova N. S., Pisetsky V. B. 2010, Methods and technologies for remote sensing of the Earth to assess the parameters of tectonic processes. *CERES*, vol. 275, no. 500, p. 1000. (In Russ.)
14. Blazhkun D. V., Ivashina E. I. 1998, State geological map of the Russian Federation. Scale 1:200,000. Verkhnevilyuyskaya series. Sheets R-49-XXXIII (Tympychan River), R-49-XXXIV (Khamaaki), O-49-III (Tereshkino): explanatory note. Moscow, 78 p. (In Russ.)
15. Dukart Yu. A. 1978, Geological map of the USSR. Scale 1:200,000. Vekhnevilyui series. Sheet R-49-XXX: explanatory note. Moscow, 70 p.
16. 2014, Arrangement of the oil rim of the Botuobinskoye deposit of the Chayandinskoye oil and gas condensate field with the allocation of the stage of pilot work: technical report on engineering surveys. Stage 3. Construction of the Chayanda–ESPO oil pipeline. In 5 vols. Vol. 2.1 (part 2). Saratov, 412 p. (In Russ.)
17. Strokova L. A., Nechaev D. A. 2022, Role of hazardous geological processes in operation of the Chayanda– ESPO oil pipeline. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University Geo Assets Engineering*, vol. 333, no. 9, pp. 86–98. <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/9/3752> (In Russ.)
18. Strokova L. A. 2019, Recognition of geological processes in permafrost conditions. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, vol. 78, no. 8, pp. 5517–5530. <https://doi.org/10.1007/s10064-019-01511-4>

The article was received on December 02, 2021

Анализ влияния рейтинговых методик оценивания массива на его физико-механические характеристики и на расчет крепи вертикального ствола

Петр Алексеевич ДЕМЕНКОВ*
Дмитрий Александрович КОТИКОВ**
Екатерина Леонидовна РОМАНОВА***

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация

Цель работы – сравнительный анализ влияния использования различных рейтинговых методик на оценку прочности и устойчивости массива, а также на результаты расчета напряжений на внутреннем контуре крепи вертикального ствола.

Актуальность работы. Прогноз развития деформаций породного контура вертикального ствола при ведении проходческих и горных работ является неотъемлемой частью изысканий в области геомеханики, достоверность которого зависит от корректности определения механических характеристик породного массива. Для этого необходимо с помощью применения одной из существующих методик оценки массива перейти от показателей испытанного образца керна к показателям свойств в массиве. Неизменная потребность в добыче полезного ископаемого диктует необходимость строительства капитальных горных выработок, в том числе стволов, что обуславливает актуальность выявления области применения существующих методик оценки устойчивости вмещающего массива.

Методы исследования. Данная работа представляет собой теоретическое исследование, в ходе которого были использованы логические, аналитические методы научного познания, количественный и качественный статистический анализ, синтез данных, приемы математизации и функциональный анализ. На основании данных контрольно-стволового бурения был произведен переход от физико-механических характеристик образца к физико-механическим характеристикам массива с помощью разных рейтинговых методик оценки породы, после чего были определены модуль деформации массива и напряжение на контуре крепи и проведен сравнительный анализ полученных результатов.

Результаты работы и область их применения. В работе приведен обзор рейтинговых систем классификации оценки структурной нарушенности породного массива с выраженными эмпирическими зависимостями. Представлены некоторые аналитические методики определения устойчивости, выполнен обзор методов оценки с использованием полевых приборов и численного моделирования. Приведены исследования влияния различных рейтинговых систем оценки массива на определение модуля деформации массива и на напряжения в крепи на примере пяти скважин контрольно-стволового бурения на двух различных месторождениях как в геостатических, так и в осложненных тектоникой горно-геологических условиях. По результатам исследования были установлены следующие зависимости: при одинаковых исходных физико-механических свойствах образца после перехода к характеристикам массива с помощью показателя *GSI* модуль деформации массива значительно выше, чем при использовании рейтинга *RMR*; при расчете напряжений на контуре крепи с использованием показателя *GSI* напряжения на внутреннем контуре крепи значительно меньше, чем при расчете с помощью рейтинга *RMR*. Областью применения полученных результатов является наука геомеханика, а также отрасль промышленного подземного строительства.

Выводы. При расчете модуля упругости горной породы и напряжений на контуре крепи методы оценки устойчивости массива существенно влияют на результаты вычислений. Оценка массива с помощью только рейтинговых систем недостоверна, подобная инженерная задача требует использования более двух рейтинговых систем для более точной оценки, а также дополнительного использования подходов, в частности математического моделирования.

Ключевые слова: рейтинговые классификации, *RMR*, *GSI*, вертикальный ствол, крепь, модуль деформации, напряжения, сложные горно-геологические условия.

Введение

Расчет устойчивости крепи подземного сооружения начинается с оценки физико-механических свойств массива горных пород, в котором планируется заложение и эксплуатация конструкции. Полученные по результатам

лабораторных испытаний физико-механические характеристики образцов не могут напрямую использоваться для оценки несущей способности породы по причине варьирования результатов опытов в зависимости от размера образ-

✉ demenkov_pa@pers.spmi.ru;

**Kotikov_DA@pers.spmi.ru

***s215064@stud.spmi.ru

ца – масштабного эффекта. Таким образом, оценка свойств породного массива выполняется на основании детальной оценки результатов инженерно-геологических изысканий и лабораторных исследований с применением одной из существующих методик ослабления механических характеристик образца, полученных в ходе испытаний.

На прочность породного массива оказывает эффект его структурная нарушенность, степень влияния которой зависит от многих факторов. Для оценки структурной нарушенности породного массива используются различные рейтинговые показатели и классификационные схемы. Из существующих рейтинговых систем *RMR*, *GSI* и *RQD*, рассмотренные в работе, наиболее полно отражают качественное описание нарушенности породного массива и используются элементами полуэмпирических методик для прогноза устойчивости породных обнажений и рекомендаций по выбору типа и параметров крепей горных выработок. Геологический индекс прочности породного массива Хука и Брауна в основном используется для комплексной оценки влияния структурной нарушенности породного массива на деформационные и прочностные показатели породного массива.

В данной статье предложен краткий обзор существующих методов оценки массива, а также рассмотрено влияние рейтинговых методик на определение физико-механических свойств массива и последующий расчет напряжений на контуре крепи.

Обзор существующих методов оценки устойчивости и прочности массива

1. Рейтинговые системы классификации горных пород. Рейтинговые системы классификации массива горных пород – это эмпирические методы, разработанные исследователями на основе опыта, полученного в ходе реализации проектов горных производств. Этот подход предпочтительно использовать на ранней стадии разработки проекта освоения подземного пространства, когда имеется лишь ограниченная информация об объекте. Развитие ряда современных рейтинговых систем стало играть важную роль при оценке состояния массива горных пород, проектировании временной крепи, осуществлении необходимой последовательности строительства и определении местоположения выработок.

Первая успешная попытка классифицировать массив горных пород для инженерных целей была предпринята Карлом Терцаги [1]. Он предложил «простую» классификацию нагрузки горного давления для оценки нагрузки на стальную рамную крепь тоннеля. Эта рейтинговая система классификации горных массивов включала в себя девять категорий и получила широкое распространение после ее представления, однако она применима в большей степени для выработок, закрепленных рамной стальной крепью, и не подходит для выработок с анкерным или набрызг-бетонным креплением. Х. Лауффер [2] представил концепцию, связанную с временем обнажения незакрепленного участка горной выработки, которое зависит от величины пролета и качества горной породы. Первоначальное предложение Лауффера больше не используется, в то время как концепция времени обнажения использовалась и изменялась в нескольких более поздних рейтинговых системах [3, 4].

Методика определения качества горных пород (*RQD*) [5] была нацелена на количественное определение качества горной породы на основе извлечения керна при бурении. *RQD* определяется как отношение общей длины сохранных кусков керна длиной более 10 см к длине буренного участка в скважине:

$$RQD = \frac{\sum l_k > 10 \text{ см}}{l_{\text{участка}}}$$

Д. Дир [5] вывел соотношения между индексом *RQD* и инженерным качеством породы. Также были предприняты попытки соотнести *RQD* с требованиями к креплению горной выработки [6, 7]. Тем не менее А. Меритт [7] пришел к выводу, что требования к креплению, рассчитанные на основе *RQD*, неприменимы к тем случаям, когда трещины содержат тонкие глинистые прослойки или осадочный материал. Как простой индекс *RQD* предоставляет ограниченную информацию о качестве породы; влияние некоторых критических характеристик (например, ориентация и шероховатость трещин) не может быть учтена этим индексом [8]. Кроме того, значение *RQD* изменяется в зависимости от направления и сильно зависит от качества бурения и выбора участка бурения.

В настоящее время критерий *RQD* наиболее популярен для оценки свойств массива горных пород [9] и используется в качестве основного параметра в двух широко распространенных системах классификации горных пород: система рейтинга горных масс (*RMR*) и система индекса геологической прочности (*GSI*).

Была разработана [10,11] количественная классификация для массивов горных пород – геомеханическая классификация, или система рейтинга горных масс (*RMR*). В настоящее время это одна из широко используемых классификаций, которая служит наиболее гибкой, быстрой и отвечающей условиям скального массива методикой определения устойчивости массива пород.

В данной классификации используются следующие основные параметры:

- прочность пород на одноосное сжатие (*JA1*);
- оценка по величине выхода керна (*JA2*);
- расстояние между трещинами (*JA3*);
- условия трещиноватости (*JA4*);
- условия обводненности (*JA5*);
- условия ориентации трещин (*JB*);
- время существования выработки (*JT*).

Каждый из указанных параметров имеет свой рейтинговый показатель, измеряющийся в баллах, а в целом рейтинг устойчивости *RMR* определяется как сумма баллов всех учитываемых факторов:

$$RMR = JA1 + JA2 + JA3 + JA4 + JA5 + JB + JC.$$

В течение многих лет система модифицировалась путем добавления новых данных и была распространена на различные области, такие как проходка горных выработок, горнодобывающая промышленность, фундаменты плотин и устойчивость склонов [10, 12]. *RMR* также используется для оценки свойств горной породы. Например,

Бенявский [10] предложил соотношения между модулем деформации массива горных пород и значениями *RMR*; также *RMR* была использована для определения констант Хука–Брауна [13, 14].

Индекс геологической прочности (*GSI*), разработанный Е. Хуком [15], представляет собой показатель, учитывающий снижение прочности неповрежденной породы в результате различных геологических условий. Эта характеристика основана на визуальной оценке структуры породы и состояния поверхности трещин [16]. После того как значение *GSI* оценено в результате полевых наблюдений, его можно использовать для расчета параметров прочности массива горных пород и модуля деформации массива горных пород [17, 18]. Следовательно, систему *GSI* целесообразно использовать скорее как индекс для оценки параметров горной массы.

Геологический индекс прочности является безразмерной величиной и учитывает геологические особенности породного массива, его структуру и трещиноватость. Индекс *GSI* также оценивается по классификационной таблице Хука–Брауна, значения которого изменяется от 0 до 100.

Показатель *GSI* определяется на основании показателя *RQD* и параметров геомеханического рейтинга Бартон [15]:

$$GSI = \frac{52(J_r / J_a)}{1 + (J_r / J_a)} + \frac{RQD}{2},$$

где J_r – показатель шероховатости поверхности трещины; J_a – показатель заполнения трещины другой породой.

В целом рейтинговые системы и классификации горной породы, основывающиеся на полевых наблюдениях или натуральных испытаниях, просты в применении и подходят для использования на ранних стадиях строительства. Широкое применение рейтинговых систем классификации массива горных пород в проектах горного строительства показало, что они полезны для оценки состояния массива горных пород, проектирования временного крепления, а также для оценки свойств массива горных пород. Тем не менее они никогда не должны использоваться как окончательное руководство для проектирования при выборе типа, способа и материала крепления для подземных сооружений.

2. Аналитические методы оценки устойчивости массива. Наравне с рейтинговыми методиками оценки устойчивости массива также существуют и аналитические, натурно-испытательные методы и методы численного моделирования. Несмотря на то что основной акцент в данном исследовании сделан на анализе рейтинговых методик, охарактеризуем вкратце и остальные методы.

В аналитических методах решения в замкнутом виде обычно выводятся на основе теорий или законов. В подземной горной инженерии было разработано множество решений для оценки устойчивости массива горных пород и прогноза деформаций и разрушений вокруг горных выработок.

Существуют теории для горных выработок, пройденных в слоистых горных породах, в которых слоистые пласты кровли принимаются за стопку поддерживаемых

балок, вес от которых передается на опоры проема. Балки были представлены в упрощенном виде как сплошные и без шарниров, в результате чего было доказано, что разрушение произойдет в середине пролета [19]. Решения в замкнутом виде, основанные на этой теории, можно найти в исследованиях [20, 21]. Эта теория в дальнейшем получила развитие в ряде научных исследований [22, 23]. Для простых сферических и цилиндрических горных выработок были разработаны аналитические решения для расчета напряжений, деформаций, перемещений и зон текучести. Например, Г. Кирш продемонстрировал упругое решение тангенциальных и радиальных напряжений и перемещений вокруг выработки кругового сечения, которое широко используется и на сегодняшний день. Аналитические исследования для массивов горных пород с пластическим поведением представлены в работах [24, 25].

Метод конвергенции–конфигурации [26] является теоретическим инструментом для проектирования крепи подземных выработок. Он включает в себя три основные кривые, а именно: кривую реакции грунта (*GRC*), профиль продольной деформации (*LDP*) и кривую крепи (*SCC*). Построив три кривые, можно предсказать реакцию породного массива и взаимодействия между породным массивом и крепью. В работе [27] авторы применили метод конвергенции–конфигурации для горных выработок, расположенных в массиве горных пород, удовлетворяющих критерию разрушения Хука–Брауна; кривые *SCC* были получены для набрызг-бетонных и бетонных крепей, стальной арочной крепи, а также анкерных болтов и тросов. Л. Алехано [26] предложил процедуру построения кривых *GRC* для размягчающихся от деформации породных массивов; предложенный метод был использован для подбора типа крепей для горных выработок в массиве горных пород с различными характеристиками.

Аналитические методы применяются для анализа простых проблем и помогают изучить механизмы разрушения и поведения массивов горных пород. Решенные аналитически задачи чаще всего относятся к случаям с однородным, изотропным представлением горной породы для осесимметричных выработок. Получить решения в замкнутом виде для сложных задач с помощью аналитических методов непросто, в этом случае следует прибегать к помощи математического или физического моделирования [28].

3. Инструментальные методы оценки массива. Полевые приборы для натуральных наблюдений обычно применяются на всех этапах подземного проекта для различных целей. До начала строительства они используются для сбора необходимой информации для проектирования, такой как типы и свойства горной породы, ориентация трещин в массиве, направления и величины внутренних напряжений и т. д. Во время или после разработки породы натурные наблюдения играют важную роль в мониторинге массива горных пород, прогнозировании потенциального разрушения и изменения конструкции [13]. Что касается оценки устойчивости подземных сооружений, это обычно включает в себя измерение смещений, напряжений, деформаций и давлений, которые могут непосредственно показать поведение массива горных пород, или косвенных параметров, таких как микросейсмическая ак-

тивность, ультразвуковые скорости, проницаемость и т. д. Определение поведения массива горных пород и анализ устойчивости подземных выработок с помощью полевых измерений были реализованы во многих исследованиях [29, 30]. На основе данных полевого мониторинга проведено множество обратных анализов для определения модуля упругости [31] и состояния массива [32]. Кроме того, полевые измерительные приборы могут быть использованы в качестве обратной связи для оценки проектирования крепи и метода строительства или для проверки точности существующего анализа.

Применяя натурные исследования, можно получить различную информацию о состоянии массива горных пород. Однако из-за неопределенностей и сложностей, возникающих в полевых условиях, непрерывность и достоверность полученных данных мониторинга иногда сомнительна, что может привести к неэффективной оценке устойчивости массива горных пород. Прогноз состояния массива горных пород может быть поставлен под угрозу без понимания механизма разрушения породы. С другой стороны, данные полевого мониторинга могут быть использованы в обратном анализе для оценки параметров залегания или для проверки имеющегося опыта.

4. Численные методы оценки устойчивости массива. С появлением передовых компьютерных технологий численный метод стал эффективным инструментом для решения сложных проблем в горном строительстве. Оценка влияния строительства на массив горных пород является сложной задачей, на решение которой влияют различные факторы [33]. Численное моделирование может охватить наиболее известные модели поведения грунта и предоставить точные модели для решения различных инженерных задач [34, 35]. Используемые численные методы в горном строительстве подразделяются на континуальные [36], дискретные [37] и гибридные подходы.

Каждый численный метод подходит для решения определенных проблем. Чтобы правильно решить проблему с помощью численного моделирования, необходимо определить подход, опираясь на достоинства и недостатки каждого. В исследовании [38] приведен анализ возможностей и ограничений некоторых числен-

ных подходов. В целом метод сплошной среды, который подразумевает непрерывность, подходит для выработок в неповрежденных породах или сильнотрещиноватых массивах горных пород. Дискретные методы предпочтительны для решения проблем в умеренно объединенных массивах горных пород или там, где поведение разрыва является обязательным [39]. Гибридный метод является перспективным, но все еще находится в стадии разработки и на этапе добавления новых функций и поиска подходящих алгоритмов. Выбор подходящего инструмента зависит от специфических факторов, учитываемых, например, геометрию системы трещин [35]. Безусловно, опыт и знания исследователя также важны, поскольку именно он определяет, какие характеристики являются существенными, и должны быть рассмотрены применительно к решению конкретной проблемы. Для учета всего комплекса горно-геологических и горнотехнических условий конкретной выработки необходимо применение аналитических, экспериментально-аналитических и других методов расчета устойчивости массива.

Описание исследования

В данном исследовании предложено оценить изменение результатов расчета модуля упругости массива и последующего определения напряжений на внутреннем контуре крепи при одних и тех же исходных данных (результаты лабораторных испытаний образца керна из контрольно-стволовых скважин) и введении различных рейтинговых методик оценки устойчивости массива.

1. Расчет модуля упругости с учетом показателя RMR.

Модуль упругости горных пород E_m с учетом структурного ослабления определен по формуле Бенявского [10]

$$E_m = E \exp [(RMR - 100)/36],$$

где E – модуль упругости в образце; RMR – система рейтинга горных масс.

2. Расчет модуля упругости горных пород с учетом показателя GSI.

Модуль упругости горных пород E_m с учетом структурного ослабления по Хуку–Брауну определяется из формулы [40]:

$$E_m = E \left(0,02 + \frac{1 - (D/2)}{1 + \exp[(60 + 15D - GSI)/11]} \right),$$

где GSI – геологический индекс прочности; D – показатель качества буровзрывных работ [40].

Далее рассмотрим расчетную схему, использованную для определения давления на крепь для последующего расчета напряжений в ней.

Описание расчетной схемы

В данной статье предложены расчет напряжений на контуре крепи, рассчитанной по схеме двухслойного кольца [41], внешний бесконечный слой которого моделирует массив пород, нагруженный на бесконечности эквивалентными напряжениями P_{eq} , и анализ полученных данных. В работе определены напряжения на контакте крепи с массивом, напряжения в крепи и ее несущая способность при одних и тех же исходных данных – физико-механических характеристиках образца с применением различных рейтинговых методик оценки и ослабления

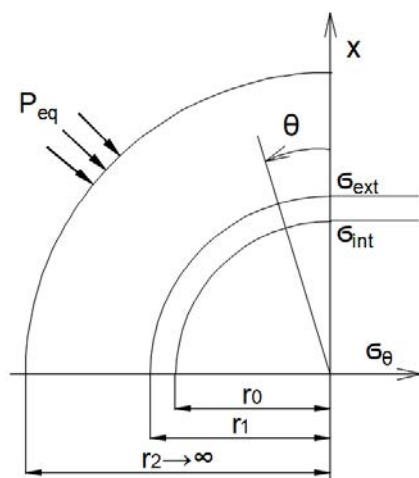


Рисунок 1. Расчетная схема работы крепи
Figure 1. Calculation scheme of the support operation

Таблица 1. Результаты расчета модуля деформации массива и напряжения на внутреннем контуре крепи
Table 1. Calculation results of the rock mass deformation modulus and stress on the inner contour of the support

Номер скважины	Порода	Глубина подошвы, м	GSI	RMR	E(GSI), МПа	E(RMR), МПа	θ_{int} (GSI), МПа	θ_{int} (RMR), МПа
3	Уртиты массивные	34,50	87,82	66,00	57 338,25	16 294,72	2,290	7,91
	Уртит шпреуштейнизированный	48,80	57,21	42,00	9844,34	16 452,45	3,274	1,99
	Уртиты массивные	58,00	85,81	61,00	51 064,73	14 181,70	1,840	6,49
	Уртит шпреуштейнизированный	67,00	80,93	53,00	38 566,87	22 332,21	2,270	3,89
	Уртиты массивные	173,16	88,79	66,00	60 626,64	16 294,72	2,350	8,59
	Ийолит трахитовидный	177,80	85,41	61,00	49 920,85	31 104,97	2,600	4,15
	Уртиты массивные	182,80	85,58	61,00	50 413,63	14 181,70	1,920	6,69
	Уртит нечетко-трахитовидный	194,30	87,14	61,00	55 122,31	27 415,70	3,890	5,58
5	Ийолит трахитовидный	202,35	85,68	61,00	50 676,22	31 104,97	3,040	3,81
	Дацитовый порфир, туфы	21,60	83,50	58,00	24 710,18	17 689,98	7,100	12,87
	Лавобрекчия риодацитов	24,30	73,00	64,00	31 434,30	22 583,47	7,690	10,42
	Туфы андезитоацитов	25,80	74,00	54,00	30 027,48	16 008,78	8,040	12,11
	Кварцевый риодацитовый порфир	36,20	81,50	68,00	35 034,66	24 574,78	6,990	9,70
	Туфы дацитов	48,50	83,00	68,00	38 966,32	26 897,96	7,270	10,24
	Кварцевый риодацит	51,70	72,50	64,00	29 307,20	21 283,81	6,580	12,27
	Туфы дацитов	56,30	82,50	58,00	35 841,11	18 836,62	7,690	12,80
	Диабаз	58,00	71,50	64,00	27 592,40	20 498,63	6,450	12,59
	Кварцевый риодацитовый порфир	62,90	84,00	58,00	38 931,53	20 160,24	7,430	12,74
	Туфы андезитоацитовых порфиритов	69,10	84,00	68,00	39 066,65	26 707,79	7,090	10,08
	Диабаз	71,40	81,50	58,00	38 027,38	20 204,62	7,450	12,34
	Туфы дацитовых порфиритов	81,00	84,00	58,00	40 377,44	20 909,00	7,280	12,09
	Туфоагломераты	144,30	83,00	68,00	38 405,24	26 510,65	7,610	10,73
	Дацитовый порфир	174,10	79,50	68,00	32 396,50	23 288,70	9,370	12,68
	Тубобрекчии	194,00	67,00	64,00	21 311,15	21 083,30	8,520	12,71
	Дацитовый порфир	197,80	62,00	59,00	20 796,90	18 137,26	8,410	12,03
Тубобрекчии	215,00	84,00	68,00	35 486,13	24 259,98	8,710	12,37	

массива. Нагрузки и воздействия, испытываемые системой «крепь–массив», представляются в виде напряжений, прикладываемых к контуру крепи.

Общий метод расчета крепи основан на применении схемы контактных напряжений. Схема расчета крепи приведена на рис. 1.

Согласно расчетной схеме (рис. 1), напряжения воздействия и прикладываемые на внешний контур крепи имеют вид:

$$P = P_{0eq} + P_{2eq} \cos 2\theta. \quad (1)$$

При расчете на горное давление при действии тектонических сил величины поля напряжений, входящие в формулу (1), находятся из выражений:

$$P_{0eq} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{\chi_0 + 1} \gamma_f \gamma_n; P_{2eq} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cdot \frac{\chi_0}{\chi_0 + 1} \gamma_f \gamma_n,$$

где χ_0 – коэффициент вида напряженного состояния породы; γ_f – коэффициент надежности по нагрузке; γ_n – коэффициент надежности по ответственности; σ_1, σ_2 – величины давления на крепь [41].

Для схемы расчета с двуслойной крепью напряжения на контактах слоев составят:

$$P_{0(1)} = P_{0eq} K_{0(2)}; P_{2(1)} = P_{2eq} K_{11(2)}; q_{2(1)} = P_{2eq} K_{21(2)},$$

где $K_{11(2)}, K_{21(2)}, K_{0(2)}$ – коэффициенты передачи внутренних нагрузок, определяемые по [41].

Нормальные тангенциальные напряжения на внутреннем и внешнем контурах сечения крепи определяются согласно следующим соотношениям:

$$\sigma_{\theta int} = P_{0(1)} m_1 - (p_{2(1)} n_1 - q_{2(1)} n_2) \cos \cos 2\theta;$$

$$\sigma_{\theta ext} = P_{0(1)} m_1' + (p_{2(1)} n_1' - q_{2(1)} n_2') \cos \cos 2\theta.$$

Значения коэффициентов m, m', n, n' определяются по [41].

Результаты расчетов

В ходе исследования были рассмотрены грунты по пяти скважинам контрольно-стволового бурения. Четыре из них принадлежат одному месторождению, оставшаяся контрольно-стволовая скважина – другому месторождению.

Результаты расчета по двум параметрам (модулю деформации и напряжению на контуре крепи) рассмотрим на примере двух скважин разных месторождений (табл. 1).

При расчете модуля упругости массива при переходе от показателей в образце к показателям в массиве с помощью рейтинговых методик GSI и RMR результаты расчета при одних и тех же исходных данных варьируются в среднем пределе от 30 до 50 %. Модуль деформации, определенный с помощью показателя GSI, значительно превышает модуль деформации, определенный с помощью рейтинга RMR. Напряжения на внутреннем контуре крепи также различаются в пределах 30–50 %, однако

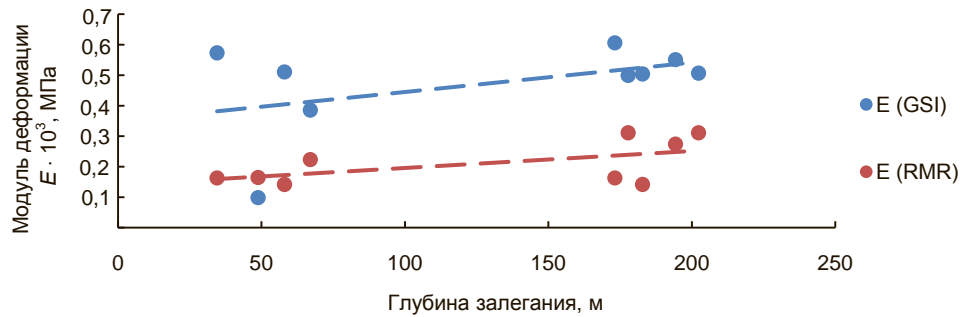


Рисунок 2. Сравнение значений модуля деформации массива по скважине 3 ИГ, рассчитанного с помощью различных рейтинговых методик

Figure 2. Comparison of the values of the rock mass deformation modulus for well 3 IG, calculated using various rating methods

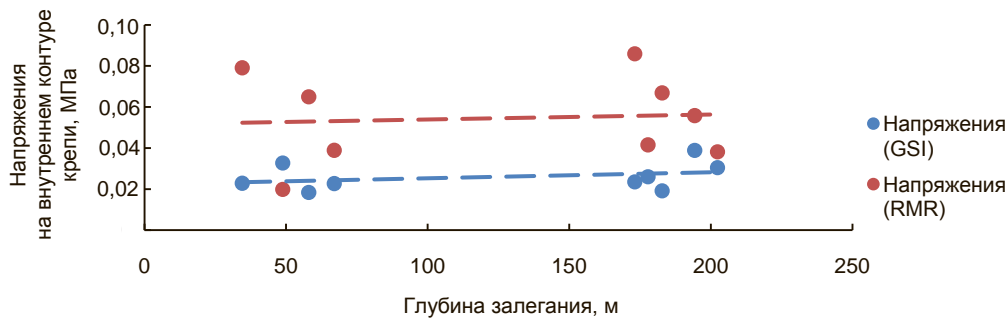


Рисунок 3. Сравнение значений напряжений на внутреннем контуре крепи ствола по скважине 3 ИГ, рассчитанных с помощью различных рейтинговых методик

Figure 3. Comparison of stress values on the inner contour of the wellbore support for well 3 IG, calculated using various rating methods

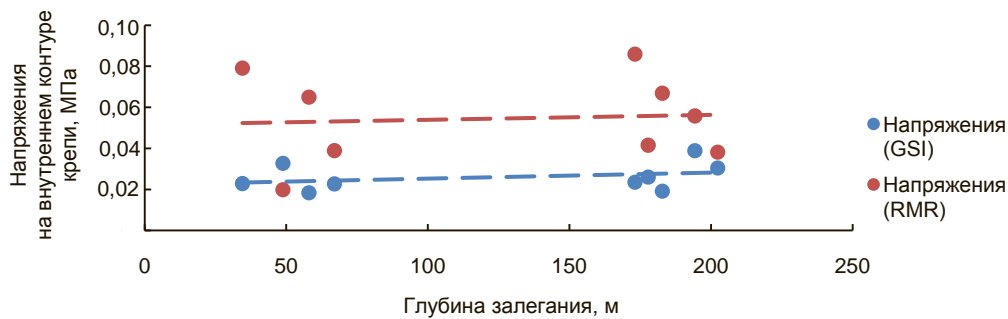


Рисунок 4. Сравнение значений модуля деформации массива по скважине 5 ИГ, рассчитанного с помощью различных рейтинговых методик

Figure 4. Comparison of the values of the rock mass deformation modulus for well 5 IG, calculated using various rating methods

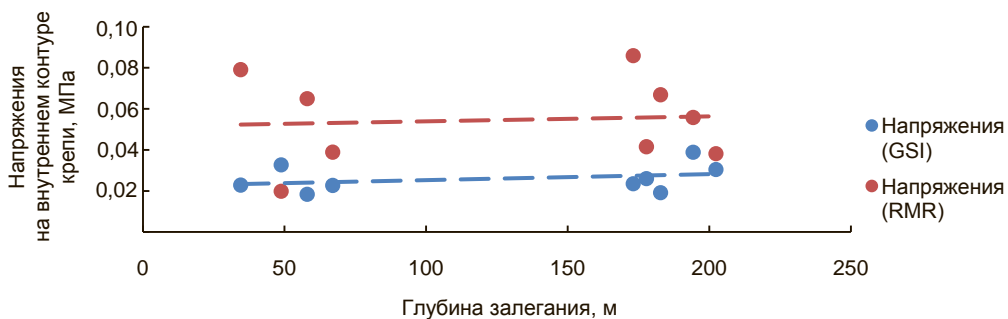


Рисунок 5. Сравнение значений напряжений на внутреннем контуре крепи ствола по скважине 3 ИГ, рассчитанных с помощью различных рейтинговых методик

Figure 5. Comparison of stress values on the inner contour of the wellbore support for well 3 IG, calculated using various rating methods

Таблица 2. Сравнительный анализ полученных усредненных характеристик массива и крепи
Table 2. Comparative analysis of the obtained average characteristics of the rock mass and support

Номер скважины	Модуль деформации E (GSI), МПа	Модуль деформации E (RMR), МПа	Разница, %	Напряжение на внутреннем контуре крепи (GSI), МПа	Напряжение на внутреннем контуре крепи (RMR), МПа	Разница, %
1	44 279,33	21 339,48	51,81	3,12	6,47	51,90
2	44 868,27	23 327,34	48,01	2,91	5,35	45,61
3	50 651,84	22 511,91	55,56	2,22	5,40	58,81
4	56 676,55	26 867,20	52,59	1,36	3,08	55,76
5	35 282,29	21 743,27	38,37	7,17	11,81	39,29

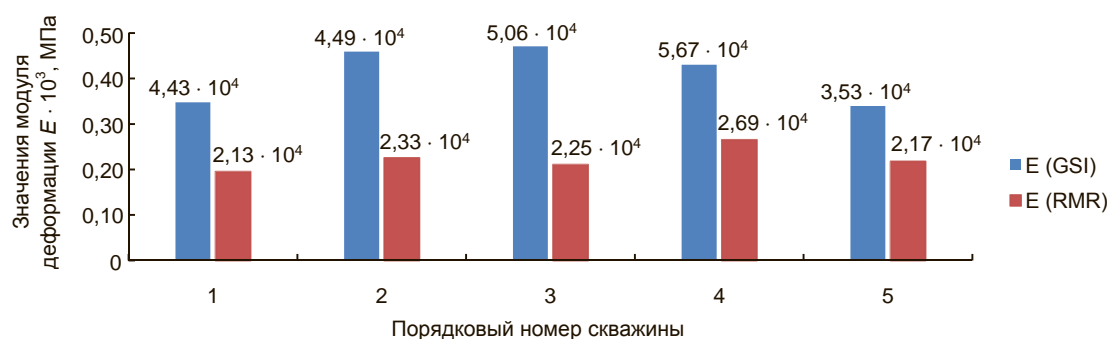


Рисунок 6. Сравнительная диаграмма значений модуля деформации массива по скважинам 1–5 ИГ
Figure 6. Comparative diagram of the values of the rock mass deformation modulus for wells 1–5 IG

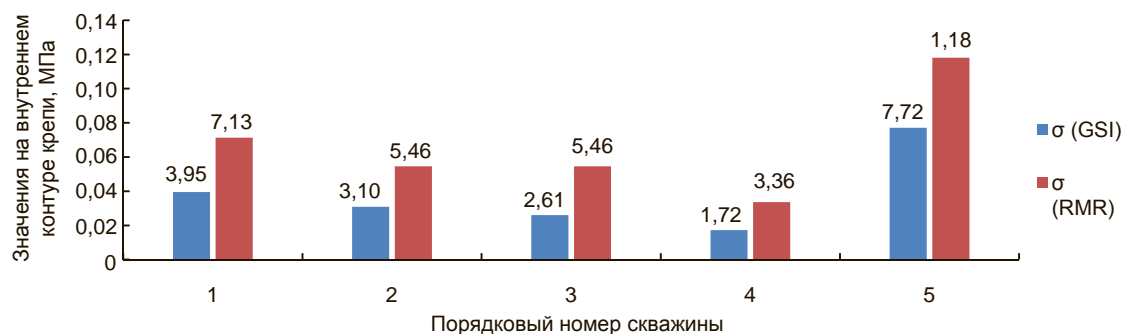


Рисунок 7. Сравнительная диаграмма значений напряжений на внутреннем контуре крепи вертикального ствола по скважинам 1–5 ИГ
Figure 7. Comparative diagram of stress values on the inner contour of the support of a vertical wellbore for wells 1–5 IG

напряжения, определенные через показатель GSI , закономерно меньше, чем определенные через показатель RMR . Для наглядности полученных результатов обратимся к графикам (рис. 2–5), построенным по результатам расчета.

Полученные графики косвенно подтверждает справедливость проведенных вычислений, поскольку линия тренда демонстрирует, что, с увеличением глубины заложения ствола постепенно возрастает давление пород на крепь и, соответственно, напряжение на контуре крепи. Значение модуля деформации по скважине 3 ИГ также постепенно возрастает, однако по скважине 5 ИГ с глубиной уменьшается. Это происходит по причине изменения характеристик породы по трассе ствола – по скважине № 3 с глубиной состояние породы улучшается, в то время как по скважине № 5 самые прочные породы находятся в середине интервала и постепенно ухудшаются с глубиной.

Для общего понимания проведенной работы представлены сравнительные диаграммы (рис. 6, 7) по всем пяти проанализированным скважинам с усредненными

значениями параметров модуля деформации и напряжений в крепи для каждой из скважин (численные значения приведены в табл. 2).

Из приведенных диаграмм видно, что усредненный модуль деформации массива, рассчитанный для каждой из скважин, отличается в среднем на 49,2 %, что является весьма значительной разницей, в то время как напряжения на контуре крепи отличаются между собой в среднем на 50,2 %.

Заключение

По результатам проведенного анализа можно сказать, что модуль деформации массива, ослабленного с помощью методик RMR и GSI , различается существенно. При применении методики оценивания массива с помощью критерия GSI значение модуля деформации массива значительно выше, а напряжения на внутреннем контуре крепи закономерно меньше, чем при использовании методики оценивания на основании рейтингового показателя RMR . При расчетах по обоим методикам касательные

напряжения на внутреннем контуре крепи ствола возрастают с увеличением глубины. Можно однозначно сказать, что различные рейтинговые методики оценивания массива существенно влияют на расчет модуля упругости массива и последующий расчет напряжений на внутреннем контуре крепи. Оценка массива исключительно с помощью рейтинговых систем недостаточна для проектирования крепи и оценки устойчивости в сложных геологических условиях. Для решения подобной инженерной задачи необходимо применять более двух рейтинговых системы для уточнения предварительной оценки массива в сочетании с другими подходами, такими как аналитические методы, полевые наблюдения и особенно численные методы [42–44].

В проектах, связанных с горным строительством, рейтинговые системы классификации массива горных пород составляют основу эмпирических методов проектирования. Учитывая совместное влияние различных геологических параметров, можно сделать вывод, что классификация массива горных пород эффективна для оценки его качества и определения предваритель-

ных рекомендаций по поддержке подземных выработок и горных работ. Поскольку эти классификации были разработаны на основе опыта проектирования и из-за того, что некоторые критические факторы не принимаются во внимание, например, явное представление прерывистости, влияние взрывных работ, поэтапных процессов проходки и деформации, зависящих от времени, использование систем классификации горной массы должно применяться вместе с численными, аналитическими и полевыми методами оценки массива.

Упомянутые методы играют различную роль в процессе строительства подземных сооружений. В связи со сложными геологическими условиями и различной конструкцией подземных выработок шахты, изменчивости и неопределенности в оценке механических свойств численное моделирование кажется наиболее оптимальным методом решения проблемы, которое следует применять в сочетании с другими методами (рейтинговыми, эмпирическими и инструментально-полевыми) с целью разработки достоверной модели.

ЛИТЕРАТУРА

1. Terzaghi K. Rock defects and loads on tunnel supports // Rock tunneling with steel supports; ed. by R. V. Proctor, T. L. White. Youngstown, Ohio: Commercial Shearing and Stamping Company, 1946. P. 17–99.
2. Lauffer H. Gebirgsklassifizierung für den Stollenbau // Geology und Bauwesen. 1958. Vol. 24. P. 46–51.
3. Barton N., Lien R., Lunde J. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support // Rock Mechanics. 1974. Vol. 6. Issue 4. P. 189–236. <https://doi.org/10.1007/BF01239496>
4. Bieniawski Z. T. Classification of Rock Masses for Engineering: The RMR System and Future Trends // Comprehensive Rock Engineering; ed. by J. A. Hudson. Oxford; N. Y.: Pergamon Press, 1993. Vol. 3. P. 553–573. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-042066-0.50028-8>
5. Deere D. U., Deere D. W. The Rock Quality Designation (RQD) Index in Practice // Rock Classification Systems for Engineering Purposes; ed. by L. Kirkaldie. Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 1988. P. 91–101. <https://doi.org/10.1520/STP48465S>
6. Deere D. U., Peck R. B., Parker H. W., Monsees J. E., Schmidt B. Design of Tunnel Support Systems // Highway Research Record. 1970. Vol. 339. P. 26–33.
7. Merritt A. H. Geologic prediction for underground excavations // North American rapid excavation and tunneling conference. N. Y.: Society of Mining Engineers, American Institute of Mining, 1972. Vol. 1. P. 115–132.
8. Bieniawski Z. T. Rock Mass Classification in Rock Engineering // Symposium on exploration for rock engineering. Rotterdam: A. A. Balkema, 1976. P. 97–106.
9. Zhang L. Determination and applications of rock quality designation (RQD) // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2016. Vol. 8. Issue 3. P. 389–397. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2015.11.008>
10. Bieniawski Z. T. Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering. N. Y.: John Wiley and Sons, 1989. 272 p.
11. Bieniawski Z. T. Engineering classification of jointed rock masses // Transactions of the South African Institution of Civil Engineers. 1973. Vol. 15. P. 335–344.
12. Geomechanics classification of jointed rock masses-mining applications // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. 1977. Vol. 14. Issue 4. P. 60. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(77\)91008-7](https://doi.org/10.1016/0148-9062(77)91008-7)
13. Hoek E., Brown E. T. Empirical Strength Criterion for Rock Masses // Journal of the Geotechnical Engineering Division. 1980. Vol. 106. Issue 9. P. 1013–1035. <https://doi.org/10.1061/AJGEB6.0001029>
14. Hoek E., Wood D. F. Rock support // Mining Magazine. 1988. Vol. 159. No. 4. P. 282–287.
15. Hoek E. Strength of rock and rock masses // International Society of Rock Mechanics New Journal. 1994. Vol. 2. P. 4–16.
16. Hoek E., Brown E. T. Practical estimates of rock mass strength // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 1997. Vol. 34. Issue 8. C. 1165–1186. [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(97\)80069-X](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(97)80069-X)
17. Marinos V., Marinos P., Hoek E. The geological strength index: applications and limitations // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 2005. Vol. 64. No. 1. P. 55–65. <https://doi.org/10.1007/s10064-004-0270-5>
18. Cai M., Kaiser P. K., Uno H., Tasaka Y., Minami M. Estimation of rock mass deformation modulus and strength of jointed hard rock masses using the GSI system // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2004. Vol. 41. Issue 1. P. 3–19. [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(03\)00025-X](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(03)00025-X)
19. Bucky P. B., Taborelli R. V. Effects of immediate roof thickness in longwall mining as determined by barodynamic experiments // Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers. 1938. Vol. 130. P. 314–332.
20. Evans W. H. The strength of undermined strata // Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers. 1941. Vol. 50. P. 475–500.
21. Please C. P., Mason D. P., Khaliq C. M., Ngnotchouye J. M. T., Hutchinson A. J., van der Merwe J. N., Yilmaz H. Fracturing of an Euler–Bernoulli beam in coal mine pillar extraction // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2013. Vol. 64. P. 132–138. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrmms.2013.08.001>
22. Sofianos A. I. Analysis and design of an underground hard rock voussoir beam roof // International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts. 1996. Vol. 33. Issue 2. P. 153–166. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(95\)00052-6](https://doi.org/10.1016/0148-9062(95)00052-6)
23. Diederichs M. S., Kaiser P. K. Authors' reply to Discussion by A. L. Sofianos // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 1999. Vol. 36. Issue 7. P. 995–997. [https://doi.org/10.1016/S0148-9062\(99\)00058-3](https://doi.org/10.1016/S0148-9062(99)00058-3)

24. Priest S. D., Brown E. T. Probabilistic stability analysis of variable rock slopes // Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy. Section A. 1983. Vol. 92. P. 1–12.
25. Sharan S. K. Exact and approximate solutions for displacements around circular openings in elastic–brittle–plastic Hoek–Brown rock // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2005. Vol. 42. Issue 4. P. 542–549. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2005.03.019>
26. Alejano L. R., Taboada J., García-Bastante F., Rodriguez P. Multi-approach back-analysis of a roof bed collapse in a mining room excavated in stratified rock // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2008. Vol. 45. Issue 6. P. 899–913. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2007.10.001>
27. Carranza-Torres C., Fairhurst C. The elasto-plastic response of underground excavations in rock masses that satisfy the Hoek–Brown failure criterion // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 1999. Vol. 36. Issue 6. C. 777–809. [https://doi.org/10.1016/S0148-9062\(99\)00047-9](https://doi.org/10.1016/S0148-9062(99)00047-9)
28. Fahimifar A., Soroush H. A theoretical approach for analysis of the interaction between grouted rockbolts and rock masses // Tunnelling and Underground Space Technology. 2005. Vol. 20. Issue 4. P. 333–343. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2004.12.005>
29. Kavvas M. J. Monitoring ground deformation in tunnelling: Current practice in transportation tunnels // Engineering Geology. 2005. Vol. 79. Issues 1–2. P. 93–113. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2004.10.011>
30. Satyanarayana I., Budi G. Evaluation of induced vertical stress during depillaring in blasting gallery panel workings // International Journal of Geo-Engineering. 2015. Vol. 6. Issue 1. P. 1–20. <https://doi.org/10.1186/s40703-014-0002-z>
31. Lang P. A., Chan T., Davison C. C., Everitt R. A., Kozak E. T., Thompson P. M. Near-field mechanical and hydraulic response of a granitic rock mass to shaft excavation // The 28th U.S. Symposium on Rock Mechanics (USRMS). OnePetro, 1987.
32. Yazdani M., Sharifzadeh M., Kamrani K., Ghorbani M. Displacement-based numerical back analysis for estimation of rock mass parameters in Siah Bisheh powerhouse cavern using continuum and discontinuum approach // Tunnelling and Underground Space Technology. 2012. Vol. 28. P. 41–48. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2011.09.002>
33. Starfield A. M., Cundall P. A. Towards a methodology for rock mechanics modelling // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. 1988. Vol. 25. Issue 3. P. 99–106. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(88\)92292-9](https://doi.org/10.1016/0148-9062(88)92292-9)
34. Sinogubov V. Yu., Popov M. G., Vilner M. A., Sotnikov R. O. Influence of stoping on formation of damaged rock zones at boundaries of large cross-section excavations in apatite–nepheline mining // Gornyi Zhurnal. 2021. P. 26–30. <https://doi.org/10.17580/gzh.2021.08.04>
35. Jing L. A review of techniques, advances and outstanding issues in numerical modelling for rock mechanics and rock engineering // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2003. Vol. 40. Issue 3. P. 283–353. [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(03\)00013-3](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(03)00013-3)
36. Hsiao F. Y., Wang C. L., Chern J. C. Numerical simulation of rock deformation for support design in tunnel intersection area // Tunnelling and underground space technology. 2009. Vol. 24. Issue 1. P. 14–21. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2008.01.003>
37. Protosenya A., Vilner M. Assessment of excavation intersections' stability in jointed rock masses using the discontinuum approach // MGPB. 2022. Vol. 38. Issue 2. P. 137–147. <https://doi.org/10.17794/rgn.2022.2.12>
38. Stead D., Coggan J. Numerical modelling of rock-slope instability // Landslides: Types, mechanisms and modeling. Cambridge: Cambridge University Press, 2012. P. 144–158.
39. Cundall P. A. A discontinuous future for numerical modelling in geomechanics? // Proceedings of the institution of civil engineers –geotechnical engineering. 2001. Vol. 149. Issue 1. P. 41–47. <https://doi.org/10.1680/geng.2001.149.1.41>
40. Hoek E., Diederichs M. S. Empirical estimation of rock mass modulus // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2006. Vol. 43. Issue 2. P. 203–215. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2005.06.005>
41. Булычев Н. С. Механика подземных сооружений. М.: Недра, 1994. 382 с.
42. Куранов А. Д., Багаутдинов И. И., Котиков Д. А., Зуев Б. Ю. Комплексный подход к прогнозу устойчивости предохранительного целика при слоевой системе разработки запасов Яковлевского месторождения // Горный журнал. 2020. № 1. С. 115–119. <https://doi.org/10.17580/gzh.2020.01.23>
43. Карасев М. А., Буслова М. А., Вильнер М. А., Нгуен Т. Т. Методика прогноза напряженно-деформированного состояния крепи вертикального ствола на участке сопряжения с горизонтальной выработкой в соляных породах // Записки Горного института. 2019. Т. 240. С. 628–637. <https://doi.org/10.31897/PMI.2019.6.628>
44. Belyakov N., Smirnova O., Alekseev F., Tan H. Numerical Simulation of the Mechanical Behavior of Fiber-Reinforced Cement Composites Subjected Dynamic Loading // Applied Sciences. 2021. Vol. 11. Issue 3. P. 1–15. Article number 1112. <https://doi.org/10.3390/app11031112>

Статья поступила в редакцию 05 декабря 2022 года

Analysis of the impact of rating methods for assessing the rock mass on its physical and mechanical characteristics and on the calculation of the support of a vertical shaft

Petr Alekseevich DEMENKOV*

Dmitriy Aleksandrovich KOTIKOV**

Ekaterina Leonidovna ROMANOVA***

Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

Abstract

The purpose of the work is to review the existing techniques for evaluating the stability of rock around the vertical shaft and to make the comparative analysis of the effect of using different rating techniques on the assessment of the strength and stability of the massif, as well as on the results of stress calculation on the inner contour of the lining.

The relevance of the work. The forecasting of the development of deformations of the vertical shaft rock contour during mining operations is an important element of geomechanics. Its reliability depends on the correctness of determining the mechanical characteristics of the rock mass. For this purpose, it is necessary, by means of application of one of existing methods of massif evaluation, to pass from characteristics of tested core samples to the characteristics of the massif. Due to the need for the mineral's extraction, vertical shafts and other underground structures are vital, therefore, the relevance of identifying the strengths or limitations of existing techniques for assessing the stability of the host rock massif should not be underestimated.

The research's methods. This work is a theoretical study, during which logical, analytical methods of scientific knowledge, quantitative and qualitative statistical analysis and synthesis of data, methods of mathematization and functional analysis were used. Based on the data of the borehole drilling, the transition was made from the physical and mechanical characteristics of the sample to the physical and mechanical characteristics of the massif, using different rating methods of rock evaluation, after which the deformation modulus of the massif and the stress on the contour of the mount were determined, and a comparative analysis of the results was carried out.

The results of the work and its area of application. The paper gives a review of rating systems of rock massif structural disturbance estimation, presents some analytical methods of stability determination, reviews evaluation methods using field instruments and numerical simulation. Studies of the influence of different massif rating systems on determining the deformation modulus of the massif and the stresses in the lining on the example of five boreholes in two different fields in tectonically complicated mining and geological conditions are presented. According to the results of the study, the following dependences were established: with the same initial physical and mechanical properties of the sample, after switching to the characteristics of the array using the *GSI* index, the deformation modulus of the array is significantly higher than when using the *RMR* rating; when calculating the stresses on the fastener contour using the *GSI* index, the stresses on the inner fastener contour are significantly lower than when calculating using the *RMR* rating. The field of application of these results is the science of geomechanics as well as the industrial underground construction industry.

Conclusions. When calculating rock modulus and stresses on the lining contour, methods of evaluating the stability of the massif significantly affect the results of the calculations. The assessment of the massif using only rating systems is not reliable; such an engineering problem requires the use of more than two rating systems for a more accurate assessment, as well as the additional use of approaches, in particular, mathematical modeling.

Keywords: rating classifications, *RMR*, *GSI*, vertical shaft, lining, deformation module, stresses, complicated mining and geological conditions.

REFERENCES

1. Terzaghi K. 1946, Rock defects and loads on tunnel supports. Rock tunneling with steel supports. Ohio, pp. 17–99.
2. Lauffer H. 1958, Gebirgsklassifizierung für den Stollenbau: *Geology und Bauwesen*, vol. 24, pp. 46–51.
3. Barton N., Lien R., Lunde J. 1974, Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics*, vol. 6, issue 4, pp. 189–236. <https://doi.org/10.1007/BF01239496>
4. Bieniawski Z. T. 1993, Classification of Rock Masses for Engineering: The *RMR* System and Future Trends. *Comprehensive Rock Engineering*. N. Y, vol. 3, pp. 553–573. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-042066-0.50028-8>
5. Deere D. U., Deere D. W. 1988, The Rock Quality Designation (*RQD*) Index in Practice. Rock Classification Systems for Engineering Purposes. Philadelphia, pp. 91–101. <https://doi.org/10.1520/STP48465S>
6. Deere D. U., Peck R. B., Parker H. W., Monsees J. E., Schmidt B. 1970, Design of Tunnel Support Systems. *Highway Research Record*, vol. 339, pp. 26–33.

✉ demenkov_pa@pers.spmi.ru;

**Kotikov_DA@pers.spmi.ru

***s215064@stud.spmi.ru

7. Merritt A. H. 1972, Geologic prediction for underground excavations. North American rapid excavation and tunneling conference. N. Y., vol. 1, pp. 115–132.
8. Bieniawski Z. T. 1976, Rock Mass Classification in Rock Engineering. Symposium on exploration for rock engineering. Rotterdam, pp. 97–106.
9. Zhang L. 2016, Determination and applications of rock quality designation (RQD). *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, vol. 8, issue 3, pp. 389–397. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2015.11.008>
10. Bieniawski Z. T. 1989, Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering. N. Y., 272 p.
11. Bieniawski Z. T. 1973, Engineering classification of jointed rock masses. *Transactions of the South African Institution of Civil Engineers*, vol. 15, pp. 335–344.
12. 1977, Geomechanics classification of jointed rock masses-mining applications. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, vol. 14, issue 4, pp. 60. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(77\)91008-7](https://doi.org/10.1016/0148-9062(77)91008-7)
13. Hoek E., Brown E. T. 1980, Empirical Strength Criterion for Rock Masses. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, vol. 106, issue 9, pp. 1013–1035. <https://doi.org/10.1061/AJGEB6.0001029>
14. Hoek E., Wood D. F. 1988, Rock support. *Mining Magazine*, vol. 159, no. 4, pp. 282–287.
15. Hoek E. 1994, Strength of rock and rock masses. *International Society of Rock Mechanics New Journal*, vol. 2, pp. 4–16.
16. Hoek E., Brown E. T. 1997, Practical estimates of rock mass strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 34, issue 8, pp. 1165–1186. [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(97\)80069-X](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(97)80069-X)
17. Marinos V., Marinou P., Hoek E. 2005, The geological strength index: applications and limitations. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, vol. 64, no. 1, pp. 55–65. <https://doi.org/10.1007/s10064-004-0270-5>
18. Cai M., Kaiser P. K., Uno H., Tasaka Y., Minami M. 2004, Estimation of rock mass deformation modulus and strength of jointed hard rock masses using the GSI system. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 41, issue 1, pp. 3–19. [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(03\)00025-X](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(03)00025-X)
19. Bucky P. B., Taborelli R. V. 1938, Effects of immediate roof thickness in longwall mining as determined by barodynamic experiments. *Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers*, vol. 130, pp. 314–332.
20. Evans W. H. 1941, The strength of undermined strata. *Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers*, vol. 50, pp. 475–500.
21. Please C. P., Mason D. P., Khalique C. M., Ngnotchouye J. M. T., Hutchinson A. J., van der Merwe J. N., Yilmaz H. 2013, Fracturing of an Euler–Bernoulli beam in coal mine pillar extraction. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 64, pp. 132–138. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrmms.2013.08.001>
22. Sofianos A. I. 1996, Analysis and design of an underground hard rock voussoir beam roof. *International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts*, vol. 33, issue 2, pp. 153–166. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(95\)00052-6](https://doi.org/10.1016/0148-9062(95)00052-6)
23. Diederichs M. S., Kaiser P. K. 1999, Authors' reply to Discussion by A. L. Sofianos. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 36, issue 7, pp. 995–997. [https://doi.org/10.1016/S0148-9062\(99\)00058-3](https://doi.org/10.1016/S0148-9062(99)00058-3)
24. Priest S. D., Brown E. T. 1983, Probabilistic stability analysis of variable rock slopes. *Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy*, section A, vol. 92, pp. 1–12.
25. Sharan S. K. 2005, Exact and approximate solutions for displacements around circular openings in elastic–brittle–plastic Hoek–Brown rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 42, issue 4, pp. 542–549. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2005.03.019>
26. Alejano L. R., Taboada J., García-Bastante F., Rodríguez P. 2008, Multi-approach back-analysis of a roof bed collapse in a mining room excavated in stratified rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 45, issue 6, pp. 899–913. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2007.10.001>
27. Carranza-Torres C., Fairhurst C. 1999, The elasto-plastic response of underground excavations in rock masses that satisfy the Hoek–Brown failure criterion. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 36, issue 6, pp. 777–809. [https://doi.org/10.1016/S0148-9062\(99\)00047-9](https://doi.org/10.1016/S0148-9062(99)00047-9)
28. Fahimifar A., Soroush H. 2005, A theoretical approach for analysis of the interaction between grouted rockbolts and rock masses. *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 20, issue 4, pp. 333–343. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2004.12.005>
29. Kavvas M. J. 2005, Monitoring ground deformation in tunnelling: Current practice in transportation tunnels. *Engineering Geology*, vol. 79, issues 1-2, pp. 93–113. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2004.10.011>
30. Satyanarayana I., Budi G. 2015, Evaluation of induced vertical stress during depillaring in blasting gallery panel workings. *International Journal of Geo-Engineering*, vol. 6, issue 1, pp. 1–20. <https://doi.org/10.1186/s40703-014-0002-z>
31. Lang P. A., Chan T., Davison C. C., Everitt R. A., Kozak E. T., Thompson P. M. 1987, Near-field mechanical and hydraulic response of a granitic rock mass to shaft excavation. The 28th U.S. Symposium on Rock Mechanics (USRMS).
32. Yazdani M., Sharifzadeh M., Kamrani K., Ghorbani M. 2012, Displacement-based numerical back analysis for estimation of rock mass parameters in Siah Bisheh powerhouse cavern using continuum and discontinuum approach. *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 28, pp. 41–48. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2011.09.002>
33. Starfield A. M., Cundall P. A. 1988, Towards a methodology for rock mechanics modelling. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, vol. 25, issue 3, pp. 99–106. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(88\)92292-9](https://doi.org/10.1016/0148-9062(88)92292-9)
34. Sinegubov V. Yu., Popov M. G., Vilner M. A., Sotnikov R. O. 2021, Influence of stoping on formation of damaged rock zones at boundaries of large cross-section excavations in apatite–nepheline mining. *Gornyi Zhurnal* [Mining Journal], pp. 26–30. <https://doi.org/10.17580/gzh.2021.08.04>
35. Jing L. 2003, A review of techniques, advances and outstanding issues in numerical modelling for rock mechanics and rock engineering. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 40, issue 3, pp. 283–353. [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(03\)00013-3](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(03)00013-3)
36. Hsiao F. Y., Wang C. L., Chern J. C. 2009, Numerical simulation of rock deformation for support design in tunnel intersection area. *Tunnelling and underground space technology*, vol. 24, issue 1, pp. 14–21. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2008.01.003>
37. Protosenya A., Vilner M. 2022, Assessment of excavation intersections' stability in jointed rock masses using the discontinuum approach. *MGPB*, vol. 38, issue 2, pp. 137–147. <https://doi.org/10.17794/rgn.2022.2.12>
38. Stead D., Coggan J. 2012, Numerical modelling of rock-slope instability. *Landslides: Types, mechanisms and modeling*. Cambridge, pp. 144–158.
39. Cundall P. A. 2001, A discontinuous future for numerical modelling in geomechanics? *Proceedings of the institution of civil engineers – geotechnical engineering*, vol. 149, issue 1, pp. 41–47. <https://doi.org/10.1680/geng.2001.149.1.41>
40. Hoek E., Diederichs M. S. 2006, Empirical estimation of rock mass modulus. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 43, issue 2, pp. 203–215. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2005.06.005>
41. Bulychov N. S. 1994, Mechanics of underground structures. Moscow, 382 p. (*In Russ.*)
42. Kuranov A. D., Bagautdinov I. I., Kotikov D. A., Zuev B. Yu. 2020, An integrated approach to predicting the stability of a safety pillar in a layered system for the development of the reserves of the Yakovlevskoye field. *Gornyi Zhurnal* [Mining Journal], no. 1, pp. 115–119. (*In Russ.*) <https://doi.org/10.17580/gzh.2020.01.23>
43. Karasev M. A., Buslova M. A., Vilner M. A., Nguyen T. T. 2019, Method for predicting the stress-strain state of the vertical shaft lining at the drift landing section in saliferous rocks. *Zapiski Gornogo instituta* [Notes of the Mining Institute], vol. 240, pp. 628–637. (*In Russ.*) <https://doi.org/10.31897/PMI.2019.6.628>
44. Belyakov N., Smirnova O., Alekseev F., Tan H. 2021, Numerical Simulation of the Mechanical Behavior of Fiber-Reinforced Cement Composites Subjected Dynamic Loading. *Applied Sciences*, vol. 11, issue 3, pp. 1–15, Article number 1112. <https://doi.org/10.3390/app11031112>

The article was received on December 05, 2022

Анализ основных факторов, определяющих значение удельного дебита водозаборной скважины

Юлия Олеговна РУСАКОВА^{1,2*}

Андрей Гариевич ПЛАВНИК^{1,2**}

Маргарита Владимировна ВАШУРИНА^{1,2***}

Анна Леонидовна ХРАМЦОВА^{1,2****}

¹Западно-Сибирский филиал Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, Тюмень, Россия

²Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

Аннотация

Цель исследования – численная характеристика основных факторов, влияющих на величину удельного дебита водозаборной скважины.

Актуальность исследования обусловлена возможностью применения полученных функциональных связей для прогноза величины удельного дебита водозаборной скважины.

Методы исследования: интерпретация кривых гамма-каротажа водозаборных скважин, корреляция ее результатов с данными исследования керна, интерполяция полученных значений по площади участка, обработка материалов гидродинамических испытаний скважин, сопоставление ее результатов с данными геофизических исследований, установление статистических связей между параметрами.

Результаты исследования и область их применения. Установлено, что величина двойного разностного параметра естественной радиоактивности водовмещающих пород значимо статистически связана с величиной глинистости образцов керна, исследованного лабораторным путем, а также с величиной водопроницаемости пород, определенной по данным гидродинамических испытаний скважин, что позволяет использовать данный параметр для характеристики фильтрационных свойств пород водоносного горизонта по величине их глинистости. Значимая статистическая связь получена между удельным дебитом водозаборной скважины и водопроницаемостью водовмещающих пород, параметром несовершенства скважины по характеру вскрытия пласта, а также параметром, численно равным отношению длины фильтра скважины к величине двойного разностного параметра естественной радиоактивности пород интервала его установки. Наличие статистической неопределенности связей обусловлено взаимным влиянием параметров. Полученные функциональные связи могут быть использованы при проектировании скважин.

Выводы. В ходе исследования подтверждено предположение, что водозаборные скважины с наибольшей длиной водоприемной части, оборудованной в наименее глинистом и, соответственно, более водопроницаемом интервале водоносного горизонта, имеют наименьшую величину несовершенства по характеру вскрытия пласта и способны обеспечить наибольший удельный дебит. Такие скважины являются наиболее эффективными при эксплуатации.

Ключевые слова: водоносный горизонт, двойной разностный параметр естественной радиоактивности, удельный дебит, несовершенство скважины, статистическая связь, коэффициент корреляции.

Введение

Подземные воды в настоящее время, в условиях постоянно растущей нагрузки на окружающую среду, являются в ряде регионов практически безальтернативным источником водоснабжения населения и объектов промышленности. В связи с этим актуальной является задача организации их наиболее эффективного каптажа, обеспечивающего высокий дебит водозаборных скважин при наименьшем понижении уровня подземных вод. Основным параметром при оценке эффективности работы водозаборного сооружения является удельный дебит скважины [1], величина которого отражает сумму факторов, определенных, с одной стороны, техническими характеристиками водозаборных скважин, с другой – геологическими особенностями разреза.

Целью исследования является определение и численная характеристика основных факторов, влияющих на величину удельного дебита водозаборной скважины.

Актуальность исследования обусловлена возможностью применения полученных функциональных связей для прогноза величины удельного дебита водозаборных скважин на перспективных для разведки территориях.

Объектом исследования являются технологические и геологические факторы на опытном участке разведки Заводоуковского месторождения, расположенного в юго-западной части Западно-Сибирского артезианского бассейна.

Месторождение эксплуатирует приуроченный к отложениям олигоцена куртамышский водоносный горизонт,

✉ julrusakova@rambler.ru

** PlavnikAG@ipgg.sbras.ru

*** MVashurina@tmnsc.ru

**** khramtsova@tmnsc.ru

представляющий собой толщу чередующихся между собой песчаных отложений с прослоями алевритов и глин. Литологические различия часто замещают друг друга, создавая значительную неоднородность разреза. В целом верхняя часть горизонта представлена более глинистыми слабопроницаемыми отложениями, средняя и нижняя части (эффективная мощность) представлены песками мелко- и среднезернистыми глинистыми с прослоями алевритов и глин (рис. 1). Глубина залегания кровли водоносного горизонта составляет 36–43 м, общая мощность – 62–80 м, эффективная – в среднем 39 м. Статический уровень отмечен на глубине 26–37 м. Верхним водоупором горизонту служат глины и алевриты туртасского горизонта, нижним – глины тавдинской свиты эоцена.

Исходными данными для исследования являются результаты гидродинамических испытаний 15 водозаборных скважин (8 опытных кустовых и 7 одиночных откачек), гамма-каротажа (ГК), проведенного в 8 водозаборных скважинах, а также данные лабораторного определения гранулометрического состава зерна одной водозаборной скважины.

Рассматриваемые параметры разделены на две группы: А и Б. К группе А отнесены технические характеристики водозаборной скважины (длина фильтра и глубина его установки), определены в процессе бурения скважин. Параметры, характеризующие геологические особенности разреза (эффективная мощность водоносного горизонта, двойной разностный параметр естественной радиоактивности, водопроницаемость и коэффициент фильтрации водовмещающих пород) отнесены к группе Б. Эти параметры определяются в настоящем исследовании по результатам геофизических работ, гидродинамических испытаний и лабораторного исследования зерна. В эту же группу включен комплексный параметр (величина несовершенства скважины по характеру вскрытия), получаемый расчетным путем на основании значений параметров групп А и Б.

Методы исследования включают интерпретацию кривых ГК водозаборных скважин, корреляцию ее результатов с данными исследования зерна, интерполяцию полученных значений по площади участка, обработку данных гидродинамических испытаний скважин, сопоставление ее результа-

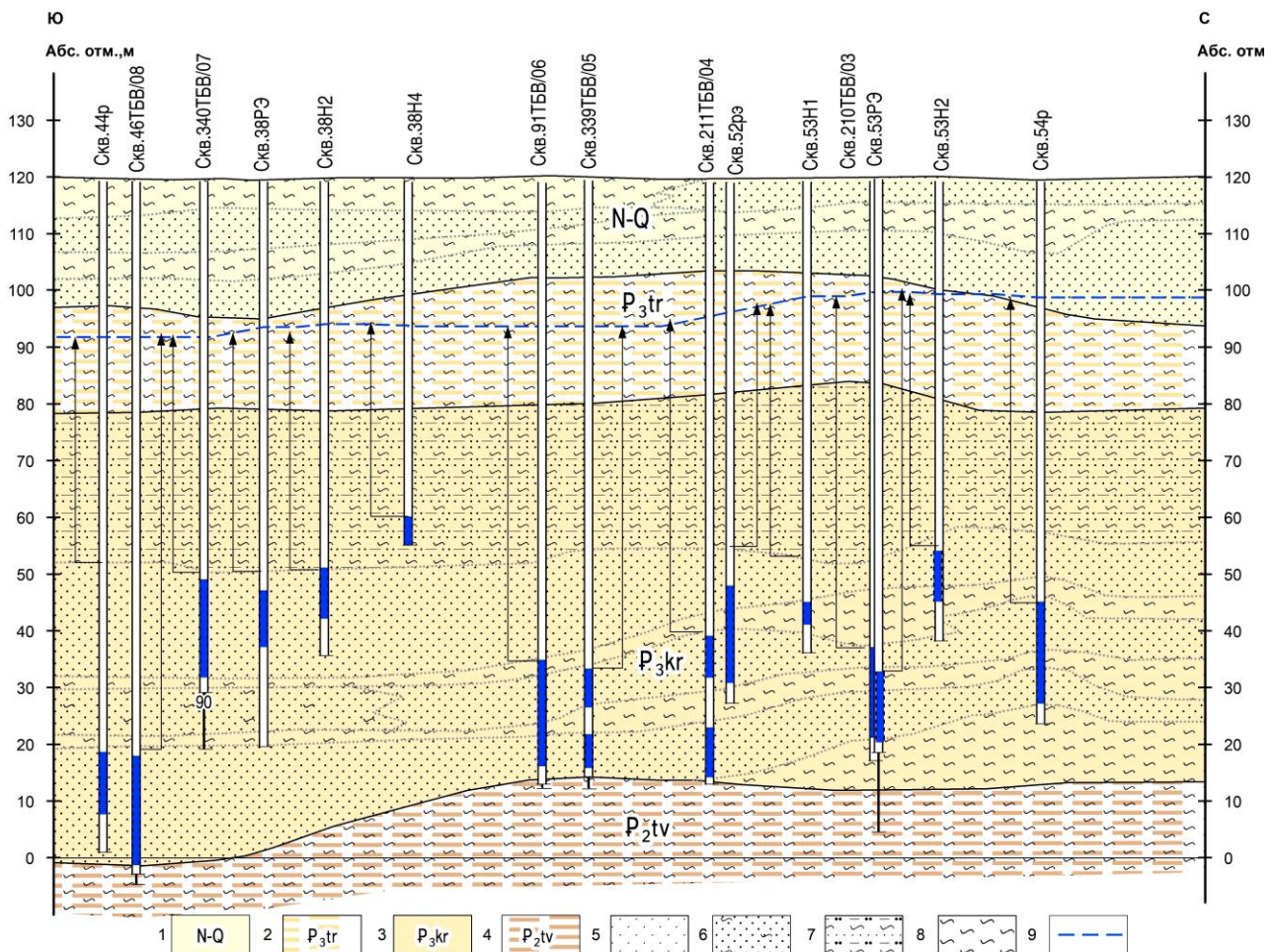


Рисунок 1. Схематический геолого-гидрогеологический разрез участка исследования: 1 – водоносный неоген-четвертичный комплекс (пески, супеси, суглинки, глины, алевриты); 2 – водоупорный, локально-слабоводоносный туртасский горизонт (глины, алевриты); 3 – водоносный куртамышский горизонт (пески, глины, алевриты); 4 – водоупорный тавдинский горизонт (глины, алевриты); 5 – пески; 6 – пески глинистые; 7 – переслаивание песков, глин, алевритов; 8 – глины плотные; 9 – положение уровня подземных вод

Figure 1. Schematic geological and hydrogeological section of the study area: 1 – aquiferous Neogene-Quaternary complex (sands, sandy loams, loams, clays, silts); 2 – impermeable, locally weakly water-bearing Turtas horizon (clays, silts); 3 – Kurtamysh aquifer (sands, clays, silts); 4 – impermeable Tavda horizon (clays, silts); 5 – sands; 6 – clayey sands; 7 – interbedding of sands, clays, silts; 8 – dense clays; 9 – the position of the groundwater level

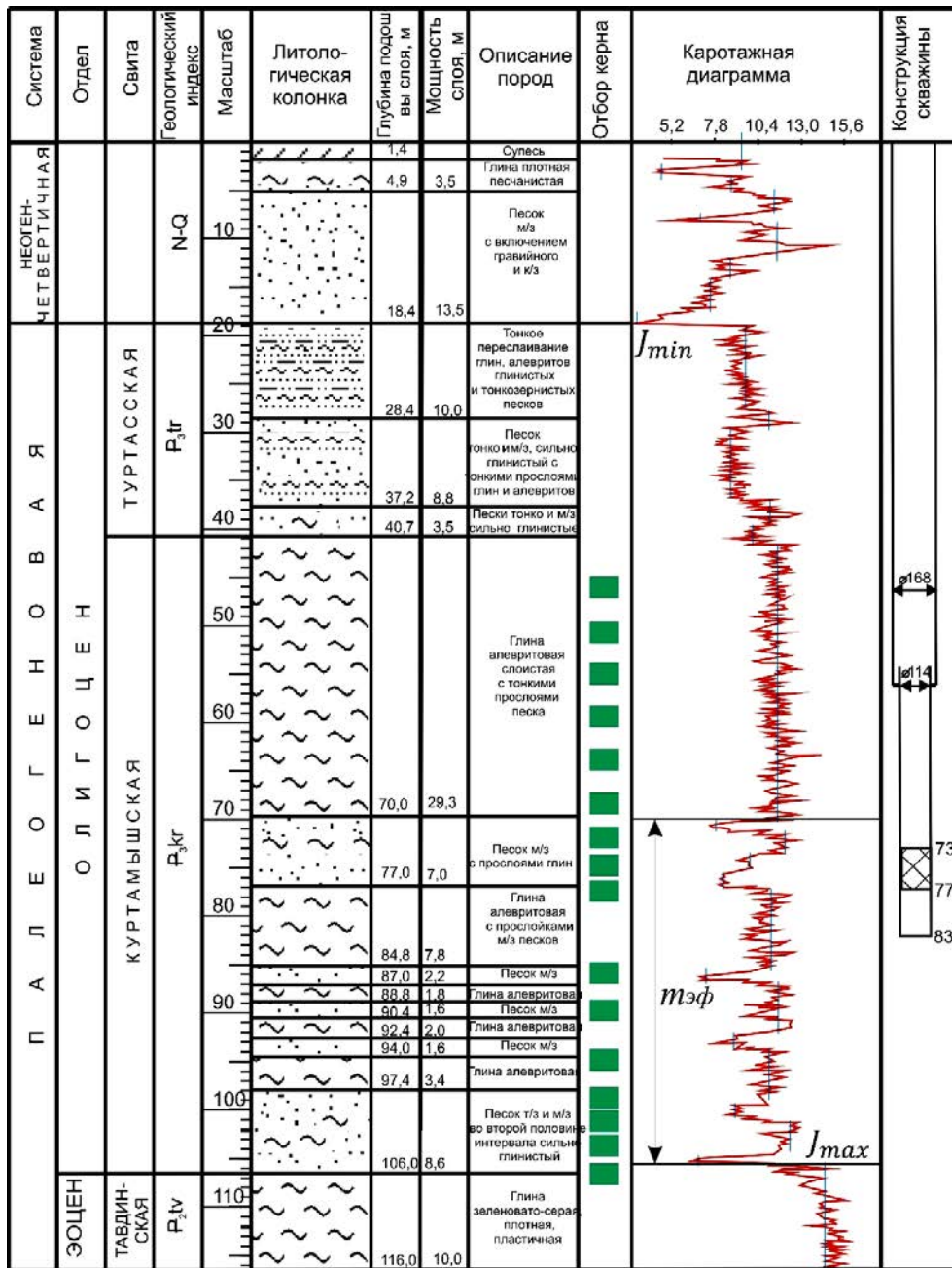


Рисунок 2. Интерпретация каротажной диаграммы водозаборной скважины 53N1
Figure 2. Interpretation of the well log for water well 53N1

тов с данными геофизических исследований, установление статистических связей между удельным дебитом и параметрами групп А и Б.

Для определения эффективной мощности водоносного горизонта и количественной оценки геофизической характеристики пород применяется метод естественной радиоактивности [2–9]. При интерпретации кривых ГК основным признаком глинистых отложений является положительная аномалия кривых, максимальная амплитуда в районе исследования приурочена к глинам тавдинской свиты. Для песков отмечается обратная зависимость – отрицательная аномалия кривых ГК, приуроченная к наиболее песчаным интервалам изучаемого разреза. Переходные значения на каротажных диаграммах интерпретируются как интервалы пе-

реслаивания песчано-алеврито-глинистых отложений (рис. 2).

Нормирование значений ГК выполняется с использованием безразмерной величины двойного разностного параметра естественной радиоактивности ΔJ , усл. ед., широко используемого в практике геофизических работ:

$$\Delta J = \frac{J_x - J_{\min}}{J_{\max} - J_{\min}},$$

где J_x – показания ГК по кривой в целевом интервале; J_{\min} – минимальные показания ГК; J_{\max} – максимальные показания ГК.

На основе полученной функции изменения двойного разностного параметра по разрезу скважины $\Delta J(h)$ опре-

Таблица 1. Характеристика параметров группы А, величины дебита и удельного дебита водозаборных скважин
Table 1. Characteristics of the parameters of group A, the value of the flow rate and the specific flow rate of water wells

Характеристика	Параметры группы А		Дебит скважин Q, м³/сут	Удельный дебит q, м³/(сут · м)
	Глубина установки филь- тра h_{ϕ} , м	Длина фильтра скважины l_{ϕ} , м		
Минимальное значение	59,00	4,00	225,00	12,17
Максимальное значение	102,00	19,00	864,00	54,98
Среднее значение	79,00	13,00	530,00	29,90
Среднее квадратическое от- клонение	12,00	5,00	186,00	13,17
Коэффициент вариации	0,16	0,37	0,35	0,44

Таблица 2. Характеристика параметров группы Б
Table 2. Characteristics of group B parameters

Характеристика	Эффективная мощность водоносного горизонта m_n , м	Водопророди- мость пород km , м²/сут	Коэффициент фильтрации k_{ϕ} , м/сут	Двойной разностный параметр		Величина несовершен- ства скважи- ны Δh_c , м
				По эффектив- ной мощности ΔJ_n , усл. ед.	По мощности эксплуатируемо- го интервала ΔJ_{ϕ} , усл. ед.	
Минимальное значение	33,00	73,00	1,00	0,39	0,33	3,00
Максимальное значение	50,00	200,00	6,00	0,71	0,69	6,00
Среднее значение	39,00	119,00	3,00	0,57	0,53	5,00
Среднее квадратическое отклонение	6,00	43,00	1,00	0,12	0,11	1,00
Коэффициент вариации	0,16	0,36	0,43	0,20	0,21	0,24

деляются осредненные параметры для интервала эффективной мощности пласта:

$$\Delta J_n = \frac{\int \Delta J(h) dh}{m_{\text{эф}}}$$

и интервала расположения фильтра скважины

$$\Delta J_{\phi} = \frac{\int \Delta J(h) dh}{l_{\phi}},$$

где интегрирование осуществляется в пределах эффективной мощности и интервала установки фильтра соответственно.

Верхняя граница эффективной мощности определяется по кровле наиболее выдержанного по мощности пласта пород с наименьшими значениями ΔJ и характерным отклонением влево кривых ГК, нижняя граница – по резкому отклонению вправо кривых ГК и соответственному возрастанию значений ΔJ (рис. 2).

Фактически полученные при интерпретации кривых ГК водозаборных скважин значения эффективной мощности водоносного горизонта и ΔJ водовмещающих пород интерполируются на неизученную геофизическим каротажем площадь [10].

Значение водопродности определяется графоаналитическими методами обработки данных гидродинамических испытаний способами временного прослеживания и подбора [11] при помощи программного комплекса Ovod [12].

Величина несовершенства водозаборной скважины по характеру вскрытия пласта Δh_c определяется по зависимости С. К. Абрамова [13]:

$$\Delta h_c = 0,01a \sqrt{\frac{QS}{k_{\phi} F}},$$

где a – коэффициент, учитывающий конструкцию водоприемной части скважины (для скважин, оборудованных гравийными фильтрами, $a \approx 20$); Q – дебит скважины, м³/сут; S – понижение уровня при откачке, м, k_{ϕ} – коэффициент фильтрации пород, м/сут; F – рабочая площадь фильтра, м², вычисляемая по формуле:

$$F = \pi d_{\phi} l_{\phi},$$

где d_{ϕ} – диаметр фильтра, м; l_{ϕ} – длина его рабочей части, м.

Коэффициент фильтрации пород определяется путем деления значений водопродности на величину эффективной мощности.

Статистические связи параметров оцениваются методом парной линейной корреляции. Значимость связи с учетом ее физического смысла контролируется значением коэффициента корреляции [14–16].

Использование метода естественной радиоактивности для характеристики фильтрационных свойств водовмещающих пород, исходя из их глинистости и установления статистической связи значений ΔJ и удельного дебита, успешно апробировано при исследовании куртамышского водоносного горизонта на участке Советского месторождения пресных подземных вод, находящегося в аналогичных геолого-гидрогеологических условиях [17].

Результаты исследования и область их применения

На участке исследования при гидродинамических испытаниях дебит водозаборных скважин изменялся в 3,8 раза (от 225 до 864 м³/сут), удельный дебит скважин

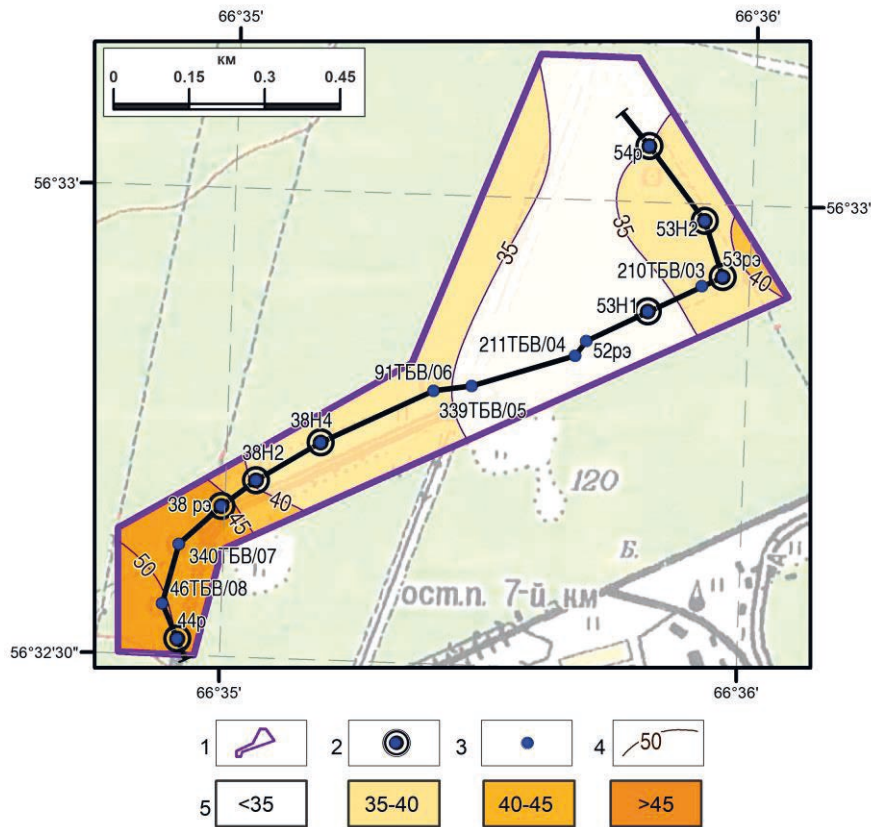


Рисунок 3. Карта эффективной мощности водоносного горизонта: 1 – участок исследования; 2 – скважина, исследованная геофизическим каротажем; 3 – скважина водозаборная; 4 – изолиния значений эффективной мощности, м; 5 – область значений эффективной мощности, м

Figure 3. Map of the effective thickness of the aquifer: 1 – study area; 2 – well investigated by geophysical logging; 3 – water well; 4 – isoline of effective power values, m; 5 – effective power range, m

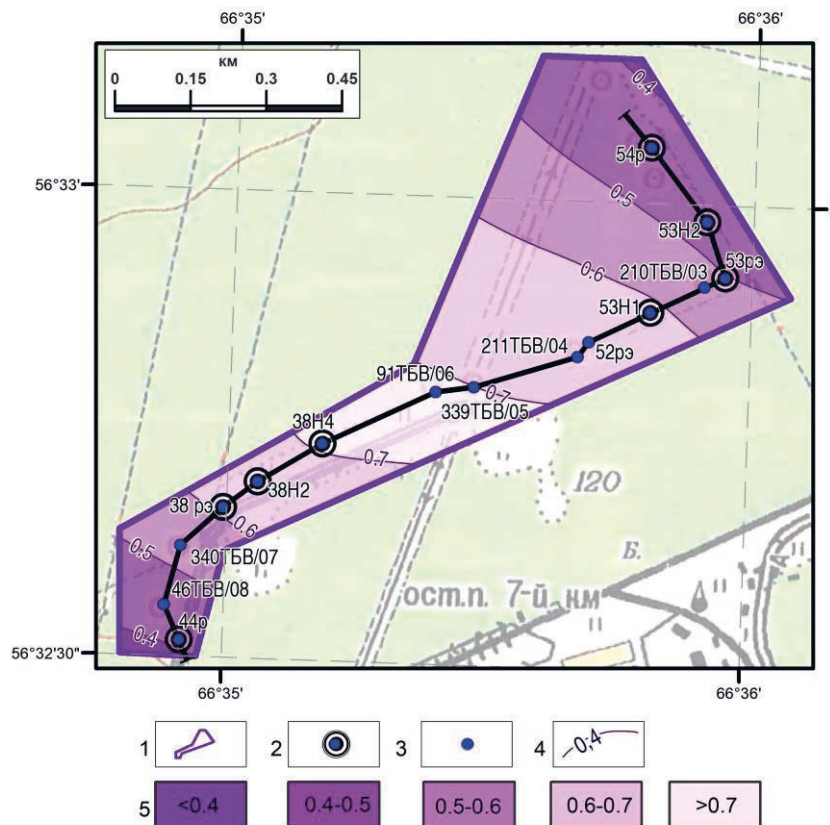


Рисунок 4. Карта значений ΔJ_n по эффективной мощности: 1 – участок исследования; 2 – скважина, исследованная геофизическим каротажем; 3 – скважина водозаборная; 4 – изолиния значения, усл. ед.; 5 – область значения, усл. ед.

Figure 4. Map of ΔJ_n values for effective power: 1 – study area; 2 – well investigated by geophysical logging; 3 – water well; 4 – value isoline, st. units; 5 – area of value, st. units

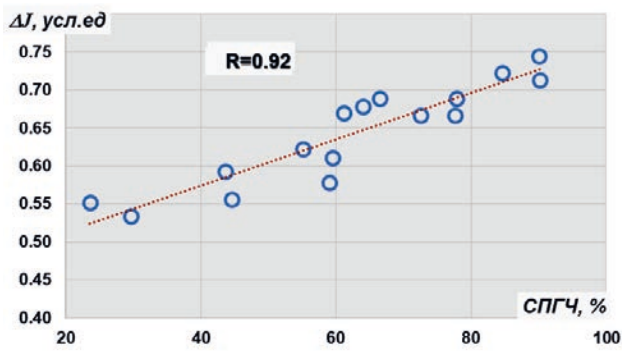


Рисунок 5. Зависимость параметров СПГЧ и ΔJ
Figure 5. Dependence of PLNG parameters and ΔJ

при этом составил 12,17–54,97 м³/(сут × м). Вариативность параметров группы А достаточно высокая: скважины оборудованы фильтрами длиной от 4 до 19 м, глубина установки в пределах водоносного изменяется от 59 до 102 м (табл. 1).

Значения параметров группы Б (табл. 2) также варьируют в широком диапазоне: эффективная мощность водоносного горизонта изменяется по площади от 33 до 50

м при наибольших значениях в юго-западной части (рис. 3); водопроницаемость в зависимости от дебита скважины при испытании составляет от 73 до 200 м²/сут; коэффициент фильтрации – от 1 до 6 м/сут. Среднее значение ΔJ эффективной мощности находится в пределах 0,39–0,71, интервала эксплуатации – в пределах 0,33–0,69. Наименьшие значения ΔJ пород водоносного горизонта приурочены к площади с наибольшей эффективной мощностью – юго-западной части участка (рис. 4). Величина несовершенства скважин по характеру вскрытия пласта оценивается значениями от 3 до 6 м и составляет от 17 до 43 % от общего понижения уровня при откачке.

Возможность применения ΔJ для характеристики глинистости водовмещающих пород подтверждается прямой тесной зависимостью (коэффициент корреляции 0,92) ΔJ пород керна скважины 53Н1 и параметра СПГЧ, определенного лабораторным путем (рис. 5).

Высокими значениями коэффициента корреляции характеризуются статистические связи: величины двойного разностного параметра пород эксплуатируемого интервала ΔJ_{ϕ} и водопроницаемости km (коэффициент корреляции 0,73), рис. 6, а; удельного дебита водозаборных скважин q и km (коэффициент корреляции 0,76),

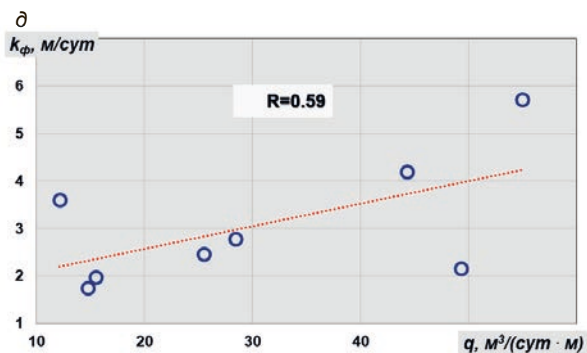
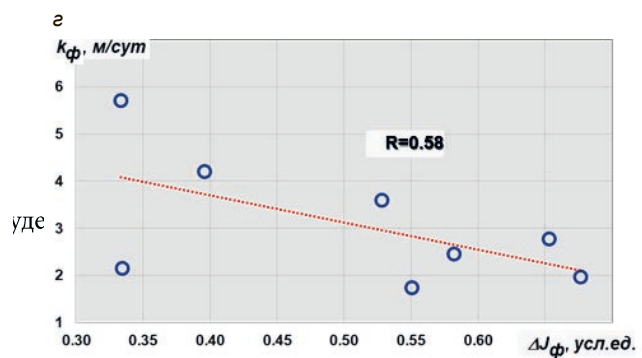
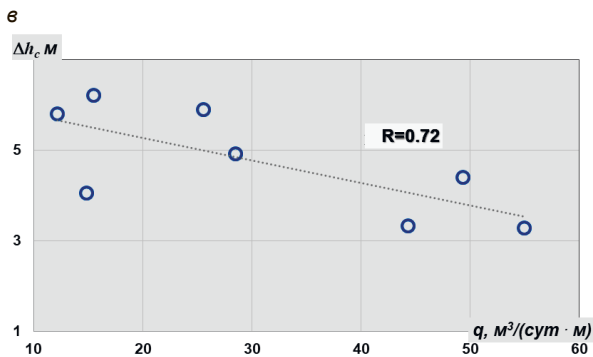
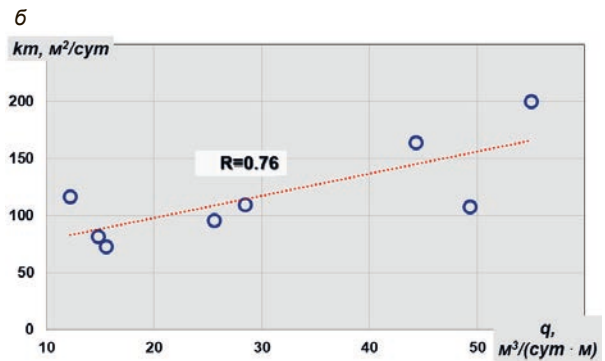
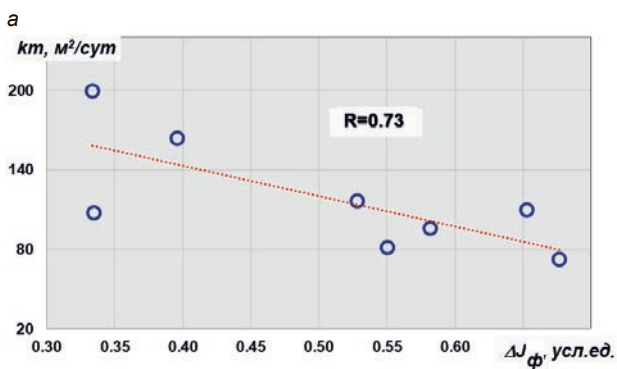


Рисунок 6. Зависимость параметров:
а – ΔJ_{ϕ} и km ; б – q и km ; в – q и Δh_c ; г – ΔJ_{ϕ} и k_{ϕ} ; д – q и k_{ϕ}
Figure 6. Dependence of parameters: а – ΔJ_{ϕ} и km ; б – q и km ; в – q и Δh_c ; г – ΔJ_{ϕ} и k_{ϕ} ; д – q и k_{ϕ}

Таблица 3. Коэффициенты корреляции удельного дебита скважин и рассматриваемых параметров
Table 3. Correlation coefficients of the specific well flow rate and the considered parameters

Параметры	Удельный дебит q , м ³ /(сут · м)
Длина фильтра l_{ϕ} , м	0,64
Глубина фильтра h_{ϕ}	0,20
Эффективная мощность m_n , м	0,16
Коэффициент водопроницаемости km , м ² /сут	0,76
Коэффициент фильтрации k_{ϕ} , м/сут	0,59
Двойной разностный параметр пород эффективной мощности ΔJ_n , усл. ед.	-0,58
Двойной разностный параметр пород интервала эксплуатации ΔJ_{ϕ} , усл. ед.	-0,67
Несовершенство скважины по характеру вскрытия пласта Δh_c , м	-0,72
Комплексный параметр $l_{\phi}/\Delta J_{\phi}$, м/усл. ед.	0,85

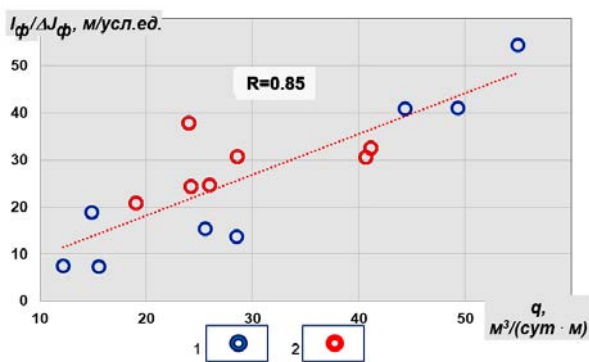


Рисунок 7. Зависимость параметров q и $l_{\phi}/\Delta J_{\phi}$: 1 – фактические значения; 2 – интерполированные значения
Figure 7. Dependence of q and $l_{\phi}/\Delta J_{\phi}$ parameters: 1 – actual values; 2 – interpolated values

исследованного лабораторным путем, с другой – с величиной водопроницаемости пород, определенной по данным гидродинамических испытаний скважин, что позволяет использовать данный параметр для характеристики фильтрационных свойств пород водоносного горизонта по величине их глинистости, что является особенно актуальным для водоносных горизонтов, заключенных в толще песчано-алеврито-глинистых отложений Западно-Сибирского артезианского бассейна. Значимая статистическая связь получена между удельным дебитом и водопроницаемостью водовмещающих пород, удельным дебитом и параметром несовершенства скважины по характеру вскрытия пласта, удельным дебитом и комплексным параметром, численно равным отношению длины фильтра скважины к величине двойного разностного параметра естественной радиоактивности пород интервала его установки.

рис. 6, б; q и параметра несовершенства скважины Δh_c (коэффициент корреляции 0,72), рис. 6, в. Более низкие значения коэффициента корреляции отмечаются для статистических связей: значений ΔJ_{ϕ} и коэффициента фильтрации k_{ϕ} (коэффициент корреляции 0,58), рис. 6, з; q и k_{ϕ} (коэффициент корреляции 0,59), рис. 6, д, что может быть связано с субъективной интерпретацией данных при графоаналитическом методе получения значений водопроницаемости и, соответственно, коэффициента фильтрации.

Результаты исследования могут быть использованы для прогноза величины удельного дебита на перспективных для разведки территориях.

Результаты парной линейной корреляции значений удельного дебита и рассматриваемых параметров групп А и Б приведены в табл. 3.

Выводы

На основании анализа результатов парной линейной корреляции отмечается, что максимальный коэффициент корреляции (0,85) достигается при оценке статистической связи удельного дебита и комплексной величины параметров групп А и Б, численно равной отношению длины фильтра к величине двойного разностного параметра естественной радиоактивности пород интервала эксплуатации $l_{\phi}/\Delta J_{\phi}$ (рис. 7).

В ходе исследования на опытном участке Заводуковского месторождения подземных вод рассмотрен комплекс основных технологических и геологических факторов, определяющих значения удельного дебита водозаборных скважин. Установлены значимые статистические связи между удельным дебитом и показателями данных факторов (длиной фильтра скважины, водопроницаемостью и глинистостью водовмещающих пород, величиной несовершенства скважины по характеру вскрытия пласта). Наличие некоторой статистической неопределенности связей между рассматриваемыми параметрами обусловлено их взаимным влиянием.

Таким образом, установлено, что величина двойного разностного параметра естественной радиоактивности водовмещающих пород значимо статистически связана, с одной стороны, с величиной глинистости образцов керна,

В результате исследования подтверждено предположение, что водозаборные скважины с наибольшей длиной водоприемной части, оборудованной в наименее глинистом и, соответственно, более водопроницаемом интервале водоносного горизонта, имеют наименьшую величину несовершенства по характеру вскрытия пласта и способны обеспечить наибольший удельный дебит. Такие скважины являются наиболее эффективными при эксплуатации, что следует учитывать при проектировании водозаборных скважин и на перспективных территориях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Биндеман Н. Н., Язвин Л. С. Оценка эксплуатационных запасов подземных вод. М.: Недра, 1970. 216 с.
2. Аулова Д. Ю., Жуков В. С., Моторыгин В. В., Нурматов Ш. Ш., Плешков И. В., Толстиков А. В. Оценка влияния глинистости на фильтрационно-емкостные свойства коллектора // Газовая промышленность. 2015. № 4(721). С. 29–32.
3. Сербаяева А. Р., Вахитова Г. Р. Выделение петроклассов по данным ГИС // Булатовские чтения. 2017. Т. 1. С. 150–153.
4. Кокарев П. Н., Диких И. А. Разделение коллекторов парфеновского горизонта Ковыктинского месторождения на литотипы с использованием материалов геофизических исследований скважин // Науки о Земле и недропользование. 2020. Т. 43. № 2(71). С. 220–229. <http://doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-2-220-229>
5. Сеидов В. М., Алибекова Е. Т. Методика оценки некоторых характеристик коллекторов по геофизическим данным в известняково-мергельных толщах // Известия УГГУ. 2017. № 4(48). С. 77–83. <http://doi.org/10.21440/2307-2091-2017-4-77-83>
6. Rider M. The geological interpretation of well logs. 2nd edition. Scotland: Rider-French Consulting Ltd., 2006. 281 p.
7. Гуров П. Н., Гусаров Д. В., Карус Е. В., Пятахин В. И., Довгополук И. М., Иванов В. М., Нефедова И. И. Оценка глинистости коллекторов методом гамма-спектрометрии естественной радиоактивности // Геология нефти и газа. 1979. № 4. С. 53–59.
8. Роженац С. М., Мамяшев В. Г., Никанорова Т. Ф. Петрофизическое обоснование литологического расчленения отложений тюменской свиты Сургутского свода по данным гамма-метода // Исследование эффективности разработки нефтяных месторождений Западной Сибири: труды СибНИИИП. Тюмень, 1984. С. 34–40.
9. Сребродольский Д. М., Матчинова Г. П. Связь естественной радиоактивности с глинистостью горных пород // Нефтегазовая геология и геофизика. 1977. № 9. С. 32–35.
10. Геокартирование на основе сплайн-аппроксимационного подхода / А. Г. Плавник [и др.]. Тюмень: ТИУ, 2021. 189 с.
11. Боровский Б. В., Самсонов Б. Г., Язвин Л. С. Методика определения параметров водоносных горизонтов по данным откачек. М.: Недра, 1979. 326 с.
12. Шутов М. С. Программа Ovod (Оптимальный водозабор): программа для ЭВМ зарегистрирована в Роспатенте 16.03.16 г. № 2016613075. М.: ФИПС, 2016.
13. Абрамов С. К., Алексеев В. С. Забор воды из подземного источника. М.: Колос, 1980. 239 с.
14. Дойч К. В. Геостатистическое моделирование коллекторов / пер. с англ.; под ред. Е. М. Бирун, Д. Н. Левина. М.; Ижевск: Ин-т компьютерных исследований, 2011. 400 с.
15. Большакова Л. В., Литвиненко А. Н. Методика применения статистического пакета анализа для проведения корреляционно-регрессионного анализа в ходе экономических исследований // Вестник экономической безопасности. 2021. № 3. С. 259–265. <http://doi.org/10.24412/2414-3995-2021-3-259-265>
16. Баврина А. П., Борисов И. Б. Современные правила применения корреляционного анализа // Медицинский альманах. 2021. № 3(68). С. 70–79.
17. Русакова Ю. О. Плавник А. Г., Ковяткина Л. А. Применение данных геофизических исследований для прогноза производительности водозаборных скважин в северной части Шаимского нефтегазодобывающего района // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2022. № 4. С. 41–56. <http://doi.org/10.31660/0445-0108-2022-4-41-56>

Статья поступила в редакцию 08 ноября 2022 года

Analysis of the main factors determining the value of the specific flow rate of a water well

Yuliya Olegovna RUSAKOVA^{1,2*}

Andrey Garievich PLAVNIK^{1,2**}

Margarita Vladimirovna VASHURINA^{1,2***}

Anna Leonidovna KHRAMTSOVA^{1,2****}

¹West Siberian Division of Trofimuk Institute of Petroleum-Gas Geology and Geophysics of the Siberian Branch of RAS, Tyumen, Russia

²Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

Abstract

Purpose of research – numerical characterization of the main factors affecting the value of the specific flow rate of a water well.

The relevance of the study is due to the possibility of using the obtained functional relationships to predict the value of the specific flow rate of a water well.

Research methods: interpretation of gamma logging curves of water wells, correlation of its results with the core survey data, interpolation of the obtained values over the section area, processing of hydrodynamic well testing materials, comparison of its results with the data of geophysical research, establishment of statistical relationships between the parameters.

The results of the study and their application. It was found that the value of the double difference parameter of natural radioactivity of water-bearing rocks statistically significantly correlated with the value of the clay content of core samples, studied in the laboratory way, as well as with the value of water permeability of rocks determined by hydrodynamic tests wells, which allows using this parameter to characterize the filtration properties of rocks aquifer by the value of their clay content. Significant statistical relationship was obtained between the specific flow rate of the water intake well and water conductivity of water-bearing rocks, the parameter of imperfection of the well by the nature of the formation opening, as well as the parameter, numerically equal to the ratio of the well filter length to the value of the double difference parameter of natural radioactivity of rocks of its installation interval. The presence of statistical uncertainty in the relationships is due to the mutual influence of the parameters. The obtained functional relations can be used in the design of wells.

Conclusions. During the study the assumption was confirmed that water intake wells with the longest water intake part, equipped in the least clayey and, accordingly, more water-permeable interval of aquifer have the least value of imperfection by nature of formation opening and are able to provide the highest specific flow rate. Such wells are the most effective in operation.

Keywords: aquifer, double difference parameter of natural radioactivity, specific flow rate, well imperfection, statistical relationship, correlation coefficient.

REFERENCES

1. Bindeman N. N., Yazvin L. S. 1970, Ocenka ekspluatatsionnyh zapasov podzemnyh vod. Moscow, 216 p. (*In Russ.*)
2. Aulova D. Yu., Zhukov V. S., Motorygin V. V., Nurmatov Sh. Sh., Pleshkov I. V., Tolstikov A. V. 2015, Ocenka vliyaniya glinistosti na fil'tracionno-emkostnye svoystva kollektora. *Gazovaya promyshlennost'*, no. 4(721), pp. 29–32. (*In Russ.*)
3. Serbaeva A. R., Vahitova G. R. 2017, Vydelenie petroklassov po dannym GIS. *Bulatovskie chteniya*, vol. 1, pp.150–153. (*In Russ.*)
4. Kokarev P. N., Dikih I. A. 2020, Division of the Parfenovsky horizon reservoirs in the Kovykta field into lithotypes using the well survey data. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie* [Earth sciences and subsoil use], vol. 43, no. 2(71), pp. 220–229. (*In Russ.*) <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-2-220-229>
5. Seidov V. M., Alibekova E. T. 2017, Metodika ocenki nekotorykh kharakteristik kollektorov po geofizicheskim dannym v izvestnyako-vo-mergelynykh toltsakh. *Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta* [News of the Ural State Mining University], no. 4(48), pp. 77–83. (*In Russ.*) <http://doi.org/10.21440/2307-2091-2017-4-77-83>
6. Rider M. 2006, The geological interpretation of well logs. 2nd edition. Scotland, Rider-French Consulting Ltd., 281 p.
7. Gurov P. N., Gusarov D. V., Karus E. V., Pyatakhin V. I., Dovgopol'yuk I. M., Ivanov V. M., Nefedova I. I. 1979, Ocenka glinistosti kollektorov metodom gamma-spektrometrii estestvennoj radioaktivnosti. *Geologiya nefi i gaza*, no. 4, pp. 53–59. (*In Russ.*)
8. Rozhenas C. M., Mamyashev V. G., Nikanorova T. F. 1984, Petrofizicheskoe obosnovanie litologicheskogo raschleneniya otlozhenij tyumenskoj svity Surgut'skogo svoda po dannym gamma-metoda. Issledovanie effektivnosti razrabotki neftyanyh mestorozhdenij Zapadnoj Sibiri. TrSibNIINP. Tyumen, pp. 34–40. (*In Russ.*)
9. Srebrodol'skij D. M., Matchinova G. P. 1977, Svyaz' estestvennoj radioaktivnosti s glinistost'yu gornyh porod. *Neftegazovaya geologiya i geofizika*, no. 9, pp. 32–35. (*In Russ.*)

✉ julrusakova@rambler.ru

**PlavnikAG@ipgg.sbras.ru

***MVashurina@tmnsc.ru

****khramtsova@tmnsc.ru

10. 2021, Geokartirovanie na osnove splayn-approksimatsionnogo podkhoda. A. G. Plavnik [et al.]. Tyumen, 189 p. (*In Russ.*)
11. Borevskij B. V., Samsonov B. G., Yazvin L. S. 1979, Metodika opredeleniya parametrov vodonosnyh gorizontov po dannym otkachek. Moscow, 326 p. (*In Russ.*)
12. Shutov M. S. Programma Ovod (Optimal'nyj vodozabor). (*In Russ.*)
13. Abramov S. K., Alekseev V. S. 1980, Water Intake from an Underground Source. Moscow, 239 p. (*In Russ.*)
14. Doich K. V. 2011, Geostatistical Reservoir Modeling. Moscow; Izhevsk, 400 p.
15. Bol'shakova L. V., Litvinenko A. N. 2021, Metodika primeneniya statisticheskogo paketa analiza dlya provedeniya korrelyacionno-regressionnogo analiza v hode ekonomicheskikh issledovanij. *Vestnik ekonomicheskoy bezopasnosti*, no. 3, pp. 259–265. (*In Russ.*). <http://doi.org/10.24412/2414-3995-2021-3-259-265>
16. Bavrina A. P., Borisov I. B. 2021, Sovremennye pravila primeneniya korrelyacionnogo analiza. *Medicinskij al'manah*, no. 3(68), pp. 70–79 (*In Russ.*)
17. Rusakova Yu. O., Plavnik A. G., Kovyatkina L. A. 2022, Application of well testing data to forecast the productivity of water intake well in the northern part of the Shaimsky oil and gas producing area. *Neft' i gaz* [Oil and Gas Studies], no. 4, pp. 41–56. (*In Russ.*). <http://doi.org/10.31660/0445-0108-2022-4-41-56>

The article was received on November 08, 2022

Геомеханические аспекты выбора технологии подземной разработки месторождения

Александр Владимирович САХНОВ
Олег Знаурович ГАБАРАЕВ*

Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), Владикавказ, Республика Северная Осетия – Алания, Россия

Аннотация

Цель и актуальность работы. Статья посвящена актуальной проблеме выбора оптимальной по условиям локализации месторождения системы разработки для вовлекаемого в эксплуатацию нового месторождения. **Целью исследований** является обоснование эффективной технологии разработки месторождения по геомеханическим условиям.

Методология. По литературным данным осуществляется критический анализ полноты выемки запасов и эффективности рекомендуемых к применению систем разработки с открытым выработанным пространством и обрушением руд. На основании анализа вариантов технологий делается инженерный прогноз результатов их реализации и рекомендуется альтернативный вариант системы.

Результаты и область применения. Описаны горно-геологические условия локализации золоторудного месторождения и схема вскрытия его запасов. Даны характеристика рекомендуемых проектом к применению вариантов систем разработки, анализ показателей качества извлечения запасов. Предложена альтернативная технология с закладкой выработанного пространства твердеющими бетонными смесями, отличающаяся более высокими показателями качества добываемых руд. Показано, что качество руд является функцией полноты учета геомеханических факторов эксплуатации месторождений. Отмечено, что утилизация хвостов обогащения руд возможна только при условии их деметаллизации до определенных пределов и обозначено направление осуществления этого. Предложена эколого-экономическая модель оценки эффективности технологии разработки месторождения по соотношению эколого-экономических показателей.

Выводы. Условиям рассматриваемого сложноструктурного месторождения ценных руд отвечают варианты систем разработки с закладкой выработанного пространства твердеющими бетонными смесями, обеспечивающие управляющий контроль напряжений в рудовмещающих массивах и существенно более высокое качество добываемых руд, применяемое оборудование и инфраструктура.

Ключевые слова: золоторудное месторождение, запасы, система разработки, качество извлечения, закладка, твердеющие смеси, геомеханические факторы, модель.

Введение

Золото-серебряное месторождение Кекура имеет форму штока, в плане имеет зональное строение и локализовано в пределах геологической структуры шириной 15–40 км и протяженностью 1600 км. Основу разреза составляют вулканогенно-терригенные породы триасового и юрского возраста. Тектономикститы характеризуются хрупкими и пластическими деформациями стратифицированных толщ и секущих их интрузивных тел [1].

Рудная минерализация вмещается гранодиоритами, березитизированными и образующими крупное интрузивное тело в центральной части массива. Месторождение является узлом пересечения разрывных структур.

С поверхности массив представляет собой тело, удлиненное в северо-восточном направлении вдоль разломов соответствующей системы. Длинная ось массива составляет около 6 км при ширине 2–4 км.

Основной объем интрузии составляют кварцевые монцодиориты. Между монцодиоритами и гранодиоритами устанавливаются интрузивные контакты. Массив

имеет форму штокообразной интрузии с крутыми контактами.

Вмещающими породами рудного массива служат интенсивно тектонизированные флишоиды, а также терригенные и вулканогенно-терригенные породы. Рудоконтролирующим фактором золотого оруденения в пределах рудного поля является структурно-тектонический. Месторождение контролируется узлами пересечений разрывных структур разных направлений.

Отличительной особенностью рудной зоны является присутствие даек лампрофиров мощностью от первых сантиметров до 2–5 м, которые играют роль структурных реперов. В пределах месторождения помимо даек лампрофиров выявлено широкое развитие других пород дайкового комплекса, включающего серию даек гранодиорит-порфиров, диоритовых порфиритов и кварцевых порфиров.

Схема вскрытия подземных запасов определяется взаимодействием основных факторов, в том числе: ре-

*gabaraev59@mail.ru18

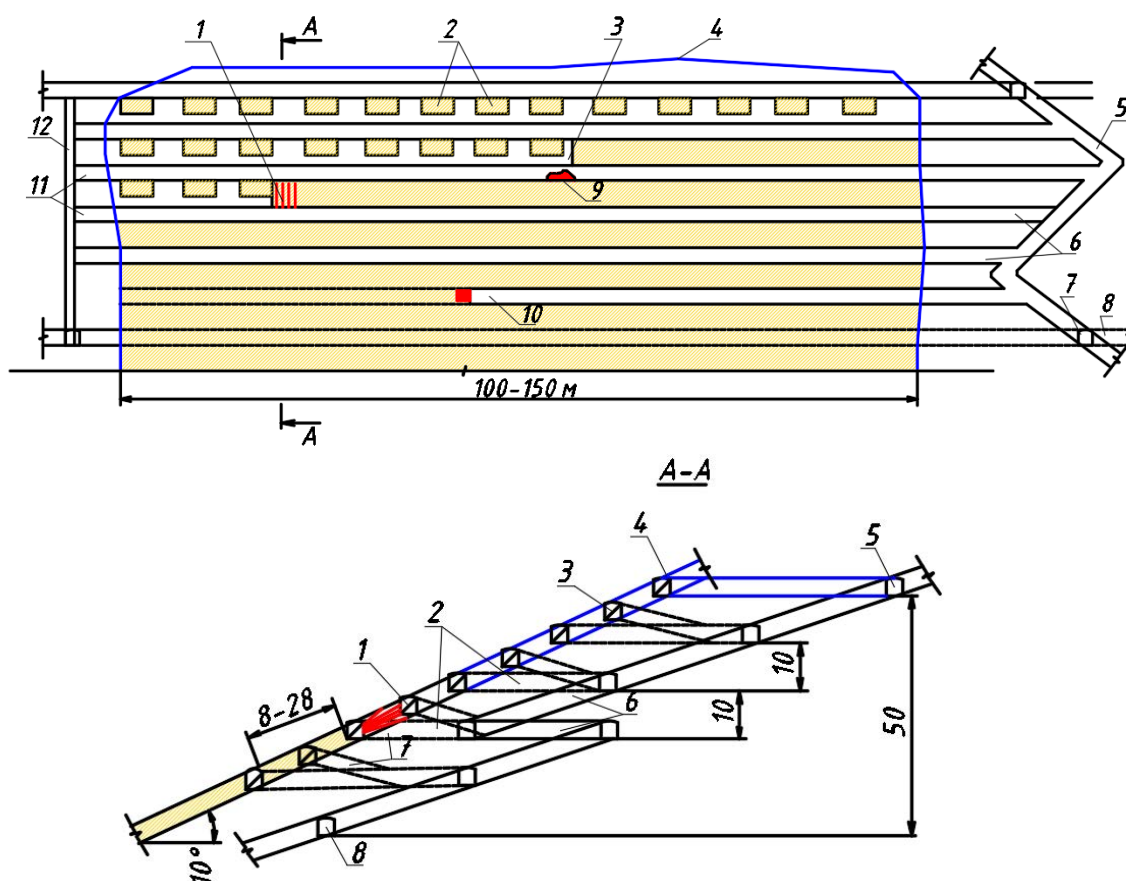


Рисунок 1. Камерно-столбовая система разработки: 1 – забой; 2 – рудные целики; 3 – камера; 4 – контур оруденения; 5 – наклонный съезд; 6 – заезд на подэтаж; 7 – квершлаг; 8 – штрек; 9 – отбитая руда; 10 – подэтажный штрек; 11 – доставочные штреки; 12 – слепой ствол

Figure 1. Room and pillar mining system: 1 – face; 2 – ore pillars; 3 – room; 4 – mineralization contour; 5 – runaway; 6 – entry to the subfloor; 7 – crosscut; 8 – drift; 9 – broken ore; 10 – sublevel drift; 11 – delivery drifts; 12 – blind shaft

льеф местности, параметры залегания рудных тел, применяемое оборудование, влияние открытых и подземных горных работ, инфраструктура. Вскрытие запасов осуществляется наклонными съездами, штольней, квершлагами, полевыми штреками.

По условиям локализации месторождение относится к сложноструктурным, где качество добываемых руд определяется поведением рудовмещающего массива при обнажении в силовых полях напряжений [2–4].

Близким аналогом рассматриваемому месторождению является месторождение Маныбайское (Северный Казахстан).

В качестве основной системы разработки проектируется камерно-столбовая система разработки для слабонаклонных рудных тел и подэтажное обрушение для крутопадающих рудных тел [5–7].

Вопросы отработки месторождений рассматриваемого типа формируют актуальную проблему, поскольку соседствуют с проблемой сохранения окружающей среды от технологических воздействий [8–12].

Целью исследования является анализ допустимых к применению по условиям локализации месторождения Кекура технологий разработки. Для достижения цели решаются задачи, в том числе обзор возможных систем разработки, оценка потерь и разубоживания при выемке запасов и направления удешевления стоимости получения товарного продукта.

Таблица 1. Параметры очистного блока

Table 1. Cleaning block parameters

Параметры	Значения
Высота по падению, м	110
Длина по простиранию, м	110
Мощность рудного тела, м	4,8
Высота этажа, м	50
Геологические запасы блока, т	154 000
Потери, %	10,5
Разубоживание, %	19,1
Эксплуатационные запасы блока, т	170 000

Полученные результаты

Камерно-столбовая система разработки. Расстояние по высоте между основными откаточными горизонтами составляет 50 м. Длина рудного участка по простиранию определяется параметрами рудного тела.

При отработке запасов панели для поддержания очистного пространства оставляются междукamerные целики, размеры которых принимаются на основании геомеханических расчетов.

Схема камерно-столбовой системы разработки представлена на рис. 1.

Объемы подготовительно-нарезных работ сведены в табл. 1.

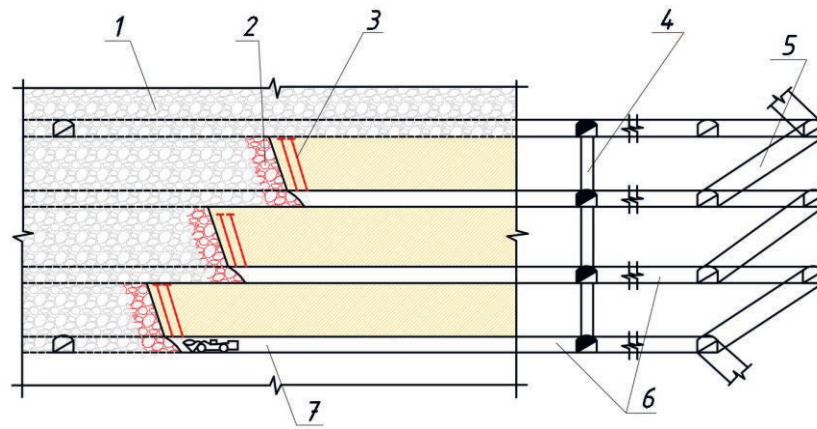


Рисунок 2. Система разработки с подэтажным обрушением: 1 – обрушенная порода; 2 – отбитая руда; 3 – взрывные скважины; 4 – вентиляционно-ходовой восстающий; 5 – наклонный съезд; 6 – заезд; 7 – буро-доставочный штрек
Figure 2. Development system with sublevel caving: 1 – collapsed rock; 2 – broken ore; 3 – blast holes; 4 – ventilation-running rising; 5 – runaway; 6 – incline; 7 – drilling-delivery drift

Виды потерь при камерно-столбовой системе разработки:

- в целиках под дном и в бортах карьера;
- на контакте с вмещающими породами и под рудным штреком;
- на почве после отгрузки руды из забоя;
- в выработанном пространстве при погашении целиков.

Для обеспечения устойчивости пород кровли при обнажении камеры рекомендуется выдерживать соотношение 25 % запасов в целиках и 75 % запасов в отработке. Использование породных включений в качестве целиков позволяет снизить потери.

Разубоживание происходит:

- на контактах с породами при проходке выработок;
- на контактах с породами за счет их прихвата при отбойке запасов камер;
- при погашении целиков.

Расчетное содержание металлов в разубоживающей массе составляет 0,34 г/т.

При камерно-столбовой системе разработки напряжения в рудовмещающем массиве распределяются на систему целиков. Ослабление несущей способности одного из них перераспределяет напряжения, что достигает критического значения при доработке целиков во вторую стадию.

Выемка запасов целиков буровзрывным способом сопровождается потерей отбитой руды в недоступном выработанном пространстве, а оставление – к потерям всех запасов целика. При погашении целиков нарушается устойчивость нижнего несущего слоя пород над выработкой, происходит обрушение скальных пород в пределах свода естественного равновесия и выше, что разубоживает руду до забалансового значения.

Система разработки с подэтажным обрушением и торцевым выпуском руды. Система разработки с подэтажным обрушением и торцевым выпуском руды рекомендована для отработки крутопадающих тел. Месторождение отрабатывается сплошной выемкой в отступающем порядке подэтажами через 20 м по вертикали. Блок подготавливается заездами, пройденными из спирально-го съезда (рис. 2).

Таблица 2. Параметры блока
Table 2. Block parameters

Параметры	Значения
Длина, м	75
Высота блока, м	60
Мощность рудного тела, м	4,2
Высота этажа, м	60
Геологические запасы блока, т	50 000
Потери, %	11,3
Разубоживание, %	26,5
Эксплуатационные запасы, т	60 500

Отбойка руд осуществляется восходящими веерами скважин из буро-доставочного штрека, выпуск отбитой руды – через торец штрека. Параметры блока представлены в табл. 2.

Виды потерь при системе разработки с подэтажным обрушением:

- при отбойке на контакте с вмещающими породами;
- на почве после отгрузки руды из забоя;
- при выпуске под обрушенными породами (рис. 3).

Разубоживание происходит:

- на контактах с породами при проходке нарезных выработок;
- на контактах с породами за счет их прихвата при отбойке камер;
- при выпуске под обрушенными породами.

Содержание в разубоживающей массе 0,34 г/т.

Система разработки с подэтажным обрушением, особенно при значительных размерах камер, радикально изменяет напряженно-деформированное состояние рудовмещающего массива. Окончательный выпуск отбитой руды в блоке приводит в движение налегающие породы с обрушением на всю высоту, нередко до земной поверхности. Примешивание пород к выпускаемой руде увеличивает потери в невыпускаемой из камеры забалансовой отбитой руде и в хвостах обогащения. А невозможность селективизации процесса отбойки руд увеличивает разубоживание руды за счет прихвата вмещающих пород.

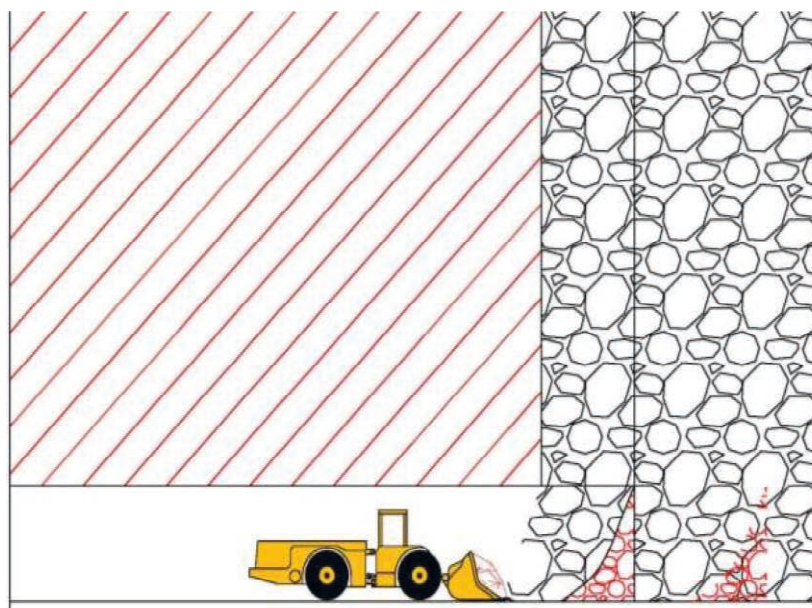


Рисунок 3. Потери руды при выпуске
Figure 3. Loss of ore during withdrawal

Таблица 3. Показатели качества технологии

Table 3. Technology quality indicators

Системы разработки	Показатели, %	
	Потери	Разубоживание
Камерно-столбовая	10,5	19,1
С подэтажным обрушением	11,3	26,5

И потери, и разубоживание увеличиваются при нечетких контактах рудного тела с вмещающими породами.

Показатели качества в добываемых системах разработки руд; потери и разубоживание велики, что удорожает производство металлов и повышает объемы отходов переработки (табл. 3).

Как правило, эти системы разработки применяют при добыче не очень ценных руд на месторождениях, сложных малоомощными, преимущественно пологопадающими рудными телами.

Система разработки с закладкой выработанного пространства твердеющими смесями. Альтернативу проектируемым системам разработки составляет камерная система разработки с закладкой выработанного пространства твердеющими бетонными смесями, которая по показателям полноты использования недр и безопасности для окружающей среды опережает все технологии.

Технологии с закладкой твердеющими смесями обеспечивают большую по сравнению с другими безопасность горных работ. Универсальность этой технологии объясняется возможностью отработки залежей с любым углом падения и мощностью в породах различной крепости.

Технология отличается повышенными затратами, поэтому стремятся использовать дешевые смеси с малой несущей способностью, создавая условия для их применения.

Сохранение рудовмещающего массива и поверхности над ним обеспечивается разделением рудного поля искусственными целиками из твердеющих смесей на разгруженные от высоких напряжений участки.

Исследование технологии управления состоянием массива на аналогичном по условиям локализации месторождении Маньбай позволило установить закономерности изменения напряженности рудовмещающего массива пород в зависимости от параметров добычных работ.

Состав твердеющей смеси для различных участков месторождений выбирается дифференцированно с учетом фактического напряженного состояния массива. Для участков месторождения с повышенными напряжениями используется упрочненный состав, а для других участков – меньшей прочности. Прочность твердеющих смесей может различаться в 2–3 раза.

Концепция обращения с отходами состоит в том, что хвосты переработки руд следует утилизировать. Реализации этого направления в горном производстве препятствует наличие в хвостах переработки руд неизвлеченных металлов [13–15].

Глубокая утилизация хвостов обогащения может обеспечить доход за счет снижения ущерба от хранения хвостов и стоимости, полученных при переработке (табл. 4).

Эколого-экономическая эффективность удешевления товарного продукта разработки месторождения за счет утилизации собственных отходов описывается моделью [16–18]:

$$\Pi = (M_{e,y} \cdot \Pi_{m,y} + Q_y \cdot \Pi_{qy}) - K(1 + E_{n,y}) + E_q + E_x,$$

где $M_{e,y}$ – количество металлов от утилизации отходов; $\Pi_{m,y}$ – цена утилизированных металлов; Q_y – количе-

Таблица 4. Соотношение компонентов твердеющих смесей

Table 4. The ratio of the components of hardening mixtures

Цемент	Расход компонентов, кг/м ³				Прочность закладки, МПа	
	Вяжущие хвосты	Вода	Инертные хвосты	Время твердения, сут		
				28	90	
–	270	380	1370	0,13	0,17	
30	–	380	1620	0,16	0,28	
30	130	380	1490	0,36	0,60	
30	270	380	1370	0,56	0,78	
30	300	380	1340	0,60	0,82	
60	130	380	1460	0,46	0,68	
60	190	380	1410	0,54	0,84	
60	220	380	1380	0,58	0,88	
60	250	380	1350	0,66	0,93	
60	300	380	1300	0,76	0,96	
80	–	380	1455	0,42	0,66	

ство восстановленных эффектов в окружающей среде; $C_{гв}$ – цена утилизированных веществ; E_q – коэффициент процентной ставки на кредит для утилизации; E_x – коэффициент процентной ставки на кредит для производства металлов; $E_{н.у}$ – коэффициент процентной ставки на экологию; K – затраты на управление хранилищами.

Вопросы выбора систем разработки получили освещение в работах ряда исследователей [18–21].

Выводы

Выбор оптимальной по условиям локализации месторождения системы разработки при освоении новых месторождений формирует актуальную проблему, успех решения которой зависит от полноты учета геомеханиче-

ских условий локализации оруденения.

Критерием эффективности систем разработки чаще всего является качество эксплуатации запасов: потери и разубоживание руд. Данному критерию в большей мере отвечает технология с закладкой выработанного пространства твердеющими бетонными смесями.

Качество руд является функцией полноты учета геомеханических факторов эксплуатации месторождений.

Условиям осваиваемого сложноструктурного месторождения ценных руд отвечает система разработки с закладкой выработанного пространства твердеющими бетонными смесями, обеспечивающая управление напряжениями в рудовмещающих массивах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Технический проект разработки месторождения Кекура. СРО АСП Союз «Проекты Сибири»; рег. № СРО-П-009-05062009. Чита: Забайкалзолотопроект, 2021. 230 с.
2. Khasheva Z. M., Golik V. I. The ways of recovery in economy of the depressed mining enterprises of the Russian Caucasus // International Business Management. 2015. Vol. 9(6). P. 1210–1216.
3. Сергеев В. В., Версиков С. О., Версикова Е. С. Ефимов А. М. Концепция повышения безопасности камерно-столбовых систем разработки при выемке наклонных рудных залежей // Вестник МАНЭБ. 2012. Т. 17. № 2. С. 65–66.
4. Голик В. И., Разоренов Ю. И., Дмитрак Ю. В., Габараев О. З. Повышение безопасности подземной добычи руд учетом геодинамики массива // Безопасность труда в промышленности. 2019. № 8. С. 36–42. <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2019-8-36-42>
5. Валиев Н. Г., Беркович В. Х., Пропп В. Д., Кокарев К. В. Проблемы отработки предохранительных целиков при эксплуатации рудных месторождений // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2018. № 2. С. 4–9. <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2018-2-4-9>
6. Валиев Н. Г., Пропп В. Д., Вандышев А. М. Кафедре горного дела УГГУ – 100 лет // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2020. № 8. С. 130–143. <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2020-8-130-143>
7. Габараев О. З., Дедегкаева Н. Т., Габараев Г. О. Технология отработки вольфрамово-молибденовых руд слепой залежи Тырнаузского месторождения // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2022. № 1. С. 92–102. <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2022-1-92-102>
8. Качурин Н. М., Стась Г. В., Корчагина Т. В., Змеев М. В. Геомеханические и аэрогазодинамические последствия подработки территорий горных отводов шахт Восточного Донбасса // Известия Тульского государственного университета. Сер. Науки о Земле. 2017. № 1. С. 170–182.
9. Земсков А. Н., Лискова М. Ю., Шарипзянова Г. Х. Закономерности изменения газодинамической и геомеханической обстановки на калийных рудниках // Устойчивое развитие горных территорий. 2021. Т. 13. № 3 (49). С. 426–432. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2021-13-3-426-432>
10. Ляшенко В. И. Природоохранные технологии освоения сложноструктурных месторождений полезных ископаемых // Маркшейдерский вестник. 2015. № 1(104). С. 10–15.
11. Душин А. В., Валиев Н. Г., Лагунова Ю. А., Шорин А. Г. Уральский горный и Московский горный: взаимодействие вузов // Горный журнал. 2018. № 4. С. 4–10. <https://doi.org/10.17580/gzh.2018.04.01>
12. Малышев Ю. Н., Титова А. В., Черкасов С. В., Булов С. В., Чесалова Е. В. Сравнительный анализ современных методов мониторинга техногенных объектов // Горная промышленность. 2017. № 6 (136). С. 46–49.
13. Комащенко В. И. Эколого-экономическая целесообразность утилизации горнопромышленных отходов с целью их переработки // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2015. № 4. С. 23–30.
14. Разоренов Ю. И., Белодедов А. А., Шмаленюк С. А. Определение потерь и разубоживания при разработке месторождений полезных ископаемых // ГИАБ. 2009. № 9. С. 47–50.
15. Абрамкин Н. И., Захарова Р. А., Абрамкина А. Н. Методологические основы технологического и экономического мониторинга горно-технических систем // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2012. № 2. С. 276–282.

16. Ключев Р. В., Босиков И. И., Майер А. В. Комплексный анализ генетических особенностей минерального вещества и технологических свойств полезных компонентов Джебказганского месторождения // Устойчивое развитие горных территорий. 2019. Т. 11. № 3 (41). С. 321–330. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2019-11-3-321-330>
17. Петров Ю. С., Хадзарагова Е. А., Соколов А. А., Шарипзянова Г. Х., Таскин А. В. Основные принципы получения, передачи и хранения информации о параметрах техногенного цикла горно-металлургического предприятия // ГИАБ. 2020. № 11-1. С. 178–188. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-11-0-178-188>
18. Ключев Р. В., Босиков И. И., Егорова Е. В., Гаврина О. А. Оценка горно-геологических и горнотехнических условий карьера «Северный» с помощью математических моделей // Устойчивое развитие горных территорий. 2020. Т. 12. № 3(45). С. 418–427. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2020-12-3-418-427>
19. Дзапаров В. Х., Харебов Г. З., Стась В. П., Стась П. П. Исследование сухих строительных смесей на основе отходов производства для подземного строительства // Сухие строительные смеси. 2020. № 1. С. 35–38.
20. Подрезов Д. Р. Задачи совершенствования управления и повышения эффективности функционирования технологических блоков рудника подземного скважинного выщелачивания урана // Горные науки и технологии. 2020. Т. 5. № 2. С. 131–153. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2020-2-131-153>
21. Хакимов Ш. И., Уринов Ш. Р. Подэтажная система с искусственными целиками из твердеющей закладки для разработки жил в сложных геомеханических условиях // Горные науки и технологии. 2021. Т. 6. № 4. С. 252–258. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-4-252-258>

Статья поступила в редакцию 07 декабря 2022 года

Geomechanical aspects of the choice of underground mining

Aleksandr Vladimirovich SAKHNOV

Oleg Znaurovich GABARAEV*

North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Republic of North Ossetia – Alania, Russia

Abstract

The purpose and the relevance of the research. The article is devoted to the current problem of choosing the optimal development system for the new field being put into operation, according to the conditions of localization of the field. **The purpose of the research** is to substantiate the effective technology of field development according to geomechanical conditions.

Methodology. Based on the literature data, a critical analysis of the completeness of the extraction of reserves and the effectiveness of the development systems recommended for use with open goaf and ore caving is carried out. Based on the analysis of technology options, an engineering forecast of the results of their implementation is made and an alternative version of the system is recommended.

Results and scope. The mining and geological conditions for the localization of a gold ore deposit and the scheme for opening its reserves are described. The characteristics of the variants of development systems recommended by the project for use, the analysis of the quality indicators of the extraction of reserves are given. An alternative technology has been proposed with the backfilling of the goaf with hardening concrete mixtures, which is distinguished by higher quality indicators of the mined ores. It is shown that the quality of ores is a function of the completeness of taking into account the geomechanical factors of exploitation of deposits. It is noted that the utilization of ore enrichment tailings is possible only if they are demetallized to certain limits, and the direction for this is indicated. An ecological and economic model for evaluating the effectiveness of the field development technology in terms of the ratio of ecological and economic indicators is proposed.

Conclusions. The conditions of the considered complex-structural deposit of valuable ores are met by variants of development systems with backfilling of the worked-out space with hardening concrete mixtures, which provide control of stresses in the ore-bearing massifs and a significantly higher quality of the mined ores, the equipment and infrastructure used.

Keywords: gold deposit, reserves, development system, extraction quality, filling, hardening mixtures, geomechanical factors, model.

REFERENCES

1. The technical project for the development of the Kekura field. Chita, 2021, 230 p. (In Russ.)
2. Khasheva Z. M., Golik V. I. 2015, The ways of recovery in economy of the depressed mining enterprises of the Russian Caucasus. *International Business Management*, vol. 9 (6), pp. 1210–1216.
3. Sergeev V. V., Versilov S. O., Versilova E. S. Efimov A. M. 2012, The concept of improving the safety of room and pillar mining systems when mining inclined ore deposits. *Vestnik MANEB* [Bulletin of the international academy of sciences of environment and safety of life], vol. 17, no. 2, pp. 65–66. (In Russ.)
4. Golik V. I., Razorenov Yu. I., Dmitrak Yu. V., Gabaraev O. Z. 2019, Safety Improvement of the Underground Ore Extraction Considering Mass Geodynamics. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti* [Occupational safety in industry], no. 8, pp. 36–42. (In Russ.) <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2019-8-36-42>
5. Valiev N. G., Berkovich V. Kh., Propp V. D., Kokarev K. V. 2018, Problems of development of safety pillars during the exploitation of ore deposits. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Gornyy zhurnal* [Minerals and mining engineering], no. 2, pp. 4–9. (In Russ.) <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2018-2-4-9>
6. Valiev N. G., Propp V. D., Vandyshev A. M. 2020, The Department of Mining of USMU is 100 years old. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Gornyy zhurnal* [Minerals and mining engineering], no. 8, pp. 130–143. (In Russ.) <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2020-8-130-143>
7. Gabaraev O. Z., Dedegkaeva N. T., Gabaraev G. O. 2022, Technology of development of tungsten-molybdenum ores of the blind deposit of the Tyrnyauz deposit. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Gornyy zhurnal* [Minerals and mining engineering], no. 1, pp. 92–102. (In Russ.) <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2022-1-92-102>
8. Kachurin N. M., Stas G. V., Korchagina T. V., Zmeev M. V. 2017, Geomechanical and aerogasdynamical consequences of underworking mining leases territories of eastern Donets basin mines. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Nauki o Zemle* [Earth Science Series], no. 1, pp. 170–182. (In Russ.)
9. Zemskov A. N., Liskova M. Yu., Sharipzyanova G. Kh. 2021, Patterns of changes in the gas-dynamic and geomechanical situation in potash mines. *Ustoychivoye razvitiye gornyykh territoriy* [Sustainable development of mountain territories], vol. 13, no. 3 (49), pp. 426–432. (In Russ.) <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2021-13-3-426-432>
10. Lyashenko V. I. 2015, Environmental technologies for the development of complex structure mineral deposits. *Marksheyderskiy vestnik* [Mine Surveying Bulletin], no. 1 (104), pp. 10–15. (In Russ.)
11. Dushin A. V., Valiev N. G., Lagunova Yu. A., Shorin A. G. 2018, Ural Mining University and Moscow Mining University: interaction of higher education institutions. *Gornyy zhurnal* [Mining magazine], no. 4, pp. 4–10. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2018.04.01>

*gabaraev59@mail.ru

12. Malyshev Yu. N., Titova A. V., Cherkasov S. V., Bulov S. V., Chesalova E. V. 2017, Advanced methods of technology-related waste deposit monitoring. Comparative analysis. *Gornaya promyshlennost'* [Russian mining industry], no. 6 (136), pp. 46–49. (In Russ.)
13. Komashchenko V. I. 2015, Environmental-economical expediency of utilizing mining-industrial wastes for their converting. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle* [News of the Tula State University. Earth Sciences], no. 4, pp. 23–30. (In Russ.)
14. Razorenov Yu. I., Belodedov A. A., Shmalenyuk S. A. 2009, Determination of losses and impoverishment in the development of mineral deposits. *GIAB* [Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)], no. 9, pp. 47–50. (In Russ.)
15. Abramkin N. I., Zakharova R. A., Abramkina A. N. 2012, Methodological foundations of technological and economic monitoring of mining systems. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle* [News of the Tula State University. Earth Sciences], no. 2, pp. 276–282. (In Russ.)
16. Klyuev R. V., Bosikov I. I., Mayer A. V. 2019, Comprehensive analysis of genetic characteristics of mineral matter and technological properties of useful components of the Dzhezkazgan deposit. *Ustoychivoye razvitiye gornykh territoriy* [Sustainable development of mountain territories], vol. 11, no. 3 (41), pp. 321–330. (In Russ.) <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2019-11-3-321-330>
17. Petrov Yu. S., Khadzharagova E. A., Sokolov A. A., Sharipzyanova G. Kh., Taskin A. V. 2020, Acquisition, transmission and storage of information on production-induced cycle in mining and metallurgy: outlines. *GIAB* [Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)], no. 11-1, pp. 178–188. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-111-0-178-188>
18. Klyuev R. V., Bosikov I. I., Egorova E. V., Gavrina O. A. 2020, Assessment of mining-geological and mining-technical conditions of the Severny quarry using mathematical models. *Ustoychivoye razvitiye gornykh territoriy* [Sustainable development of mountain territories], vol. 12, no. 3 (45), pp. 418–427. (In Russ.) <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2020-12-3-418-427>
19. Dzaparov V. Kh., Kharebov G. Z., Stas V. P., Stas P. P. 2020, Study of dry building mixes based on production waste for underground construction. *Sukhiye stroitel'nyye smesi* [Dry building mixes], no. 1, pp. 35–38. (In Russ.)
20. Podrezov D. R. 2020, The tasks of improving the management and increasing the efficiency of the operation of technological blocks of the mine of underground borehole leaching of uranium. *Gornyye nauki i tekhnologii* [Mining science and technology], vol. 5, no. 2, pp. 131–153. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2020-2-131-153>
21. Khakimov Sh. I., Urinov Sh. R. 2021, Under-level system with artificial pillars from hardening backfill for mining veins in difficult geomechanical conditions. *Gornyye nauki i tekhnologii* [Mining science and technology], vol. 6, no. 4, pp. 252–258. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-4-252-258>

The article was received on December 07, 2022

Распределение и накопление тяжелых металлов в ландшафтной катене водосбора и донных отложениях водоема на урбанизированной территории

Андрриан Анатольевич СЕЛЕЗНЕВ^{1*}

Татьяна Геннадьевна ОКУНЕВА^{3**}

Илья Владимирович ЯРМОШЕНКО^{2***}

Георгий Петрович МАЛИНОВСКИЙ^{2****}

Дарья Владимировна КИСЕЛЕВА^{1,3*****}

¹Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

²Институт промышленной экологии УрО РАН, Екатеринбург, Россия

³Институт геологии и геохимии им. акад. А. Н. Заварицкого УрО РАН, Екатеринбург, Россия

Аннотация

Актуальность работы. Одной из проблем городских территорий является поступление поллютантов в водоемы. Поступление поллютантов с селитебной зоны города с поверхностным стоком может многократно превышать поступление поллютантов с промышленных и рекреационных зон, а также от точечных источников.

Цель работы: 1) оценить распределение химических элементов в водосборах водоемов на урбанизированной территории, 2) накопление химических элементов в твердом веществе донных отложений поверхностных водоемов, у которых водосборами являются территории функциональных зон города, 3) выявить основные механизмы переноса элементов в твердом веществе с водосборов в водоемы. Исследование проведено на примере г. Екатеринбурга.

Материал для исследования составили результаты ландшафтного эколого-геохимического исследования, проведенного на территории города в 2019–2021 гг.

Результаты исследования. Получены распределения содержания элементов между функциональными ландшафтными зонами в катенах водосборов водоемов Харитоновского сада (искусственное озеро) и Юго-Западного лесопарка (озеро Чемоданчик) в г. Екатеринбурге. Распределения концентраций металлов в компонентах водосбора показывают тенденцию переноса вещества различного происхождения из компонентов ландшафта латеральными миграционными потоками в локальный базис денудации (бессточный поверхностный водоем). При этом в донных отложениях водоема происходит многократное накопление как поллютантов, так и элементов типоморфной ассоциации. Пылевые фракции являются основной транспортирующей веществом средой в водосборах.

Ключевые слова: урбанизированная среда, водоем, водосбор, катена, металлы.

Введение

Большая часть населения планеты проживает в городах. Россия является страной, где численность городского населения составляет более 70 %. В искусственно созданной среде городов происходят постоянные процессы геохимической трансформации. Антропогенная нагрузка на компоненты городского ландшафта приводит к нагрузке на объекты окружающей природной среды, в первую очередь на поверхностные водные объекты.

Донные отложения поверхностных водоемов, являясь одним из геохимических барьеров, могут выступать в качестве индикатора длительного загрязнения водных объектов от урбанизированных территорий [1–7]. Процессы формирования и изменения геохимических условий поверхностных водных объектов напрямую зависят от геохимических условий в водосборе. В водном объекте, у которого в водосборе есть урбанизированная террито-

рия, геохимические условия формируются в результате наложения антропогенного воздействия на природные особенности его формирования.

В мире накоплен большой объем исследований стока различных поллютантов с водосборов урбанизированной территории. Исследования направлены на оценку экологического состояния водных объектов, оценку экологического риска для водных организмов [8, 9], изучение закономерностей загрязнения донных отложений и поверхностных вод поллютантами [10]. Одной из значимых проблем городских территорий является поступление поллютантов в водоемы от рассредоточенных, диффузных, источников загрязнения антропогенного характера помимо стоков от точечных источников [2, 11]. Неточечные (площадные) источники загрязнения представляют собой сток с территории города талых, дождевых и по-

✉sandrian@rambler.ru

**okunevatatjana@mail.ru

***ivy@ecko.uran.ru

****georgy@ecko.uran.ru

*****podarenka@mail.ru

ливомоечных вод, внутрипочвенный сток и грунтовый сток. Сточные воды, поступающие в городские водотоки, являются существенным источником техногенных наносов [12]. От неточечных источников поллютанты могут поступать в поверхностные водоемы урбанизированной территории как в растворенном виде, так и на твердых и взвешенных частицах, а также в виде выпадений из атмосферы [13]. Поступление поллютантов и взвешенных веществ с селитебной зоны города с поверхностным стоком многократно превышает поступление поллютантов с промышленных и рекреационных зон, а также от точечных источников [11]. Неточечные источники загрязнения динамичны. Нагрузка от них на водные объекты города напрямую связана с метеорологическими условиями, с выпадением атмосферных осадков. Эти источники загрязнения трудно и зачастую невозможно идентифицировать.

Современное осадконакопление на урбанизированной территории может охарактеризовать диффузное загрязнение города. В результате нарушений в планировке ландшафта, технологий благоустройства, нарушений стока атмосферных осадков, эрозии почв и грунтов, абразии поверхностей тротуаров и асфальта, выпадений из атмосферы образуется рыхлый осадок, который накапливается на поверхностях [14]. Современные отложения и компоненты урбанизированного ландшафта в водосборе часто изучаются отдельно от компонентов водоема в эколого-геохимических и гидрохимических исследованиях на урбанизированных территориях. Различные типы отложений на урбанизированных территориях используют как геоиндикаторный компонент для решения отдельных задач. Дорожную пыль используют для оценки степени загрязнения территорий [15]. Изучается перераспределение и накопление пыли из атмосферы в результате выбросов промышленных предприятий и автотранспорта [16, 17], миграция дорожной пыли с ливневыми стоками и в виде сухих выпадений [18]. Одним из типов современных поверхностных отложений на урбанизированной территории являются поверхностно депонированные наносы в локальных понижениях микрорельефа. Эколого-геохимические исследования на основе опробования наносов позволяют учесть и охарактеризовать загрязнение от неточечных источников [14, 19, 20].

Целью работы было: 1) оценить распределение химических элементов (поллютантов и элементов из типоморфной ассоциации) в водосборах водоемов на урбанизированной территории, 2) накопление химических элементов в твердом веществе донных отложений поверхностных водоемов, у которых водосборами являются территории функциональных зон города, 3) выявить основные механизмы переноса элементов в твердом веществе с водосборов в водоемы. Исследование проводится на примере г. Екатеринбурга.

Материалы и методы

Описание Екатеринбурга. Екатеринбург имеет население примерно 1,5 млн человек и является четвертым по численности населения городом России, центром Свердловской области. Город находится на границе восточных предгорий Среднего Урала и Зауральской складчатой возвышенности, в зоне умеренного континентального климата. Средняя температура января составляет $-15,3$ °С,

а июля – $+17,4$ °С. Рельеф на территории города крупнохолмистый. Для окрестностей Екатеринбурга характерно умеренно теплое лето и умеренно суровая снежная зима. Холодный период продолжается 151 день – с ноября по март. Высокая антропогенная нагрузка в городе обусловлена большим числом автомобилей, строительных площадок, работой промышленных предприятий.

Характеристики обследуемых водоемов и их водосборов. В г. Екатеринбурге для исследования были выбраны два малых мелководных бессточных водоема: озеро Чемоданчик в Юго-Западном лесопарке ($56,802092^{\circ}$ СШ, $60,538809^{\circ}$ ВД) и озеро в Харитоновском саду ($56,846963^{\circ}$ СШ, $60,613751^{\circ}$ ВД). Водосборы водоемов расположены на сопряжениях разных функциональных зон города: селитебной, рекреационной и зоны автотранспорта (автодороги с интенсивным трафиком).

Водоем Чемоданчик расположен в Академическом районе на территории Юго-Западного лесопарка, вблизи пересечения объездной автодороги и улицы Серафимы Дерябиной. Берега водоема песчаные, с плавным заходом в воду, восточная часть водоема заболочена, в западной располагается насыпная дамба высотой около 1,8 м над уровнем воды. По берегам водоема обустроены беседки для отдыха.

Водоем в Харитоновском саду располагается в центре г. Екатеринбурга и представляет собой искусственный пруд с двумя насыпными островами. Берега островов заболочены. Сад вместе с прудом был заложен в 1826 г. Водоем был вырыт для осушения болота на реке Пеньковке, впадавшей в реку Мельковку, которая, в свою очередь, впадала в городской пруд. С южной стороны в водосборе водоема располагается Вознесенский холм, перепад высот до 13 м.

Эколого-геохимическое опробование и подготовка образцов. Исследования водоемов и их водосборов проводили с помощью подхода трансект-катен [21, 22]. Водоем и его водосбор рассматриваются как геосистема, в которой взаимодействуют гидрохимические процессы и процессы поверхностного латерального сноса вещества. В основе подхода лежит бассейновый принцип. Трансект-катена представляет собой трехмерное тело, в котором сочетаются линейная и катенарная характеристики вместе с площадной формой ландшафта в трансекте. Водосбор расчленен по трансект-катене на латеральные сопряженные участки ландшафта, последовательно сменяющие друг друга в направлении от локального водораздела к локальному базису эрозии (водоему) и имеющие функциональное назначение.

В теплый сезон года отбирались на водосборах:

- пробы дорожной пыли (или дорожного смета) с проезжей части улицы;
- грунт из верхнего слоя (5 см) на озелененном участке;
- отложения из понижений микрорельефа, поверхностные наносы.

Проба отложений локальных понижений микрорельефа и почвы отбиралась лопатой или совком [19, 20]. Пробы отложений локальных понижений микрорельефа и почвы представляют собой объединенные из проб, отобранных по 3–5 локализациям на данном ландшафтном участке.

На водосборе озера Чемоданчик отбирались:

- три пробы прибрежного грунта на песчаном берегу со стратификацией по 10 см до глубины 30 см; отбирались три параллельных керн на участке берега водоема до глу-

бины 30 см, затем керны разделялись по стратификации по горизонтам 0–10, 10–20 и 20–30 см, пробы из горизонтов объединялись и перемешивались (одна проба представляет собой материал из объединенных трех параллельно отобранных проб из данного горизонта);

- три пробы почвы из придорожного лесопарка объездной автодороги со стратификацией по 10 см до глубины 30 см;

- три пробы прибрежного грунта на берегу, заросшем травой, со стратификацией по 10 см до глубины 30 см;

- три пробы грунта из канавы в водосборе на опушке лесопарка со стратификацией по 10 см до глубины 30 см;

- три пробы почвы из лесопарка в водосборе со стратификацией по 10 см до глубины 30 см,

- одна объединенная проба рыхлых поверхностных наносов из горизонта 0–5 см на участке тропинки на дамбе водоема Чемоданчик;

- одна объединенная проба рыхлых наносов из горизонта 0–5 см на участке тропинки в кемпинге;

- одна сборная проба наносов из горизонта 0–5 см на обочине объездной дороги;

- одна сборная проба дорожного смета (дорожной пыли) с проезжей части объездной автодороги.

На водосборе озера в Харитоновском саду отбирались:

- три пробы почвы в парке на холме со стратификацией по 10 см до глубины 30 см;

- три пробы почвы в парке на склоне со стратификацией по 10 см до глубины 30 см;

- одна сборная проба рыхлых поверхностных наносов из горизонта 0–5 см на участке тропинки в парке;

- одна сборная проба рыхлых поверхностных наносов из горизонта 0–5 см на участке тропинки в парке вдоль берега водоема;

- одна сборная проба дорожного смета (дорожной пыли) с проезжей части улицы с наружной стороны парка, со стороны селитебной территории;

- одна сборная проба рыхлых наносов из горизонта 0–5 см из локальных понижений микрорельефа в жилом квартале на селитебной территории.

Схема распределения точек геохимического опробования на водосборах представлена в ранее опубликованной работе [22].

Пробы, отобранные на водосборах, сушились при комнатной температуре. Из проб извлекались: бытовой и строительный мусор, крупные ветки, корни, листья, обломки породы. Пробы с водосборов измельчались пестиком с резиновым наконечником, просеивались через сито с диаметром ячеек 3 мм (фракция > 3 мм в анализе не участвовала, поскольку представлена в основном облом-

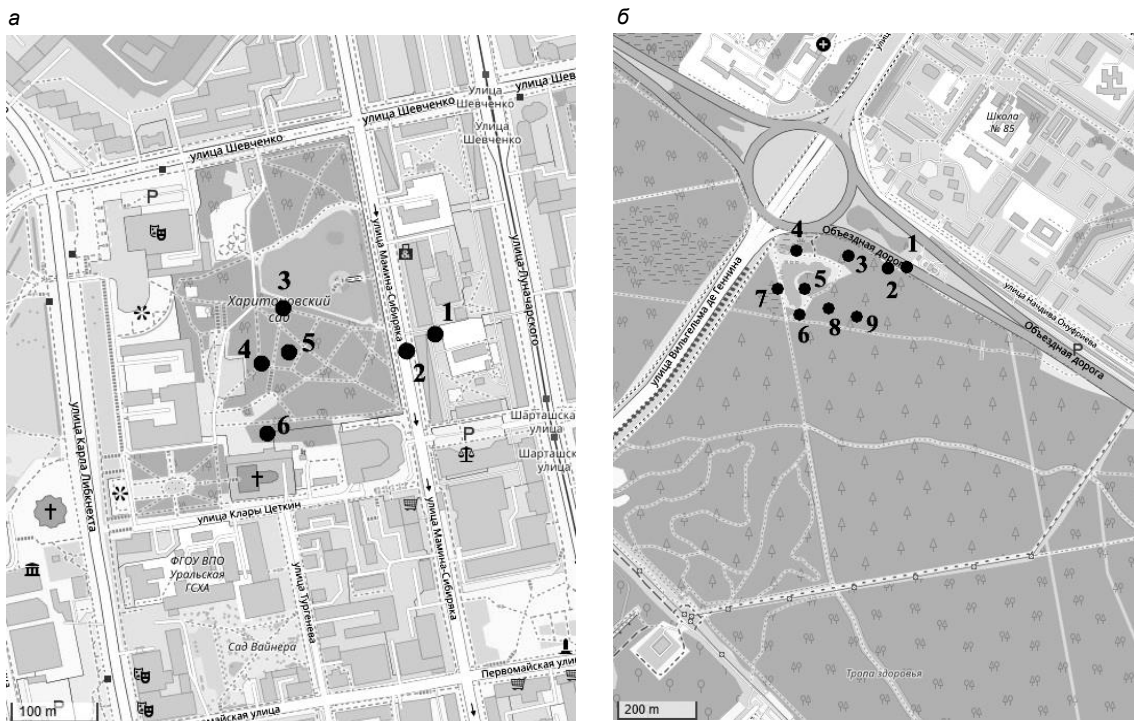


Рисунок 1. Картограммы водосборов с расположением точек отбора проб: а – водосбор водоема в Харитоновском саду (отбирались: 1 – наносы из локальных понижений микрорельефа в жилом квартале на селитебной территории; 2 – дорожная пыль с проезжей части улицы; 3 – наносы с тропинки в парке вдоль берега водоема; 4 – наносы на тропинке в парке; 5 – почва в парке на склоне; 6 – почва в парке на холме); б – водосбор водоема Чемоданчик (отбирались: 1 – дорожная пыль с проезжей части объездной автодороги; 2 – наносы с обочины объездной дороги; 3 – почвы в лесопарке вблизи объездной автодороги; 4 – наносы на тропинке в кемпинге; 5 – прибрежный грунт на берегу, заросшем травой; 6 – прибрежный грунт на песчаном берегу; 7 – наносы с тропинки на дамбе; 8 – грунт из канавы на опушке лесопарка; 9 – почва в лесопарке)

Figure 1. Schematic maps of catchment areas with the location of sampling points: а – catchment area in the Kharytonovskiy garden (the following were selected: 1 – sediments from local microrelief depressions in a residential area; 2 – road dust from the roadway; 3 – sediments from a path in the park along the shore of the reservoir; 4 – sediment on the path in the park; 5 – soil in the park on the slope; 6 – soil in the park on the hill); б – catchment area of the Chemodanchik reservoir (the following were selected: 1 – road dust from the roadway of the bypass road; 2 – sediments from the side of the bypass road; 3 – soils in the forest park near the bypass road; 4 – sediments on the path in the campsite; 5 – coastal soil on the shore, overgrown with grass; 6 – soils at the sandy edge of the pond; 7 – sediment from the path on the dam; 8 – soil from the ditch at the edge of the forest park; 9 – soil in the forest park)

тыся до нескольких раз относительно компонентов ландшафтной катены водосбора.

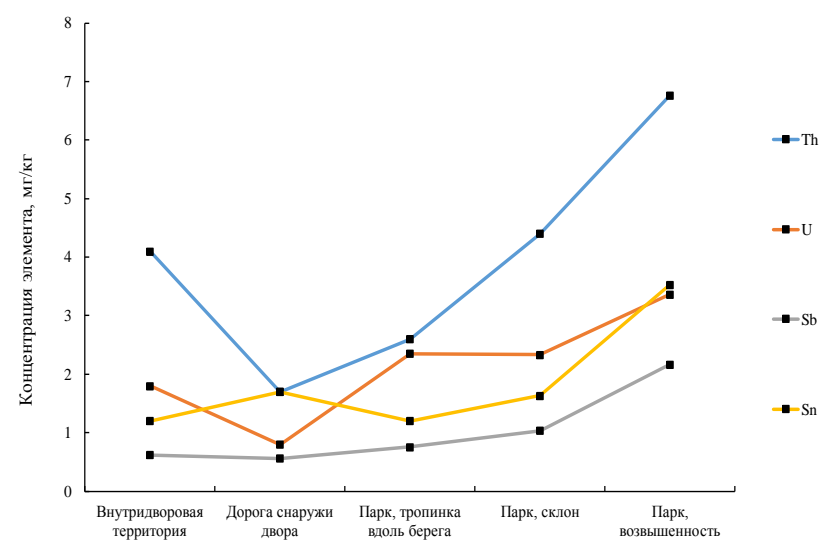
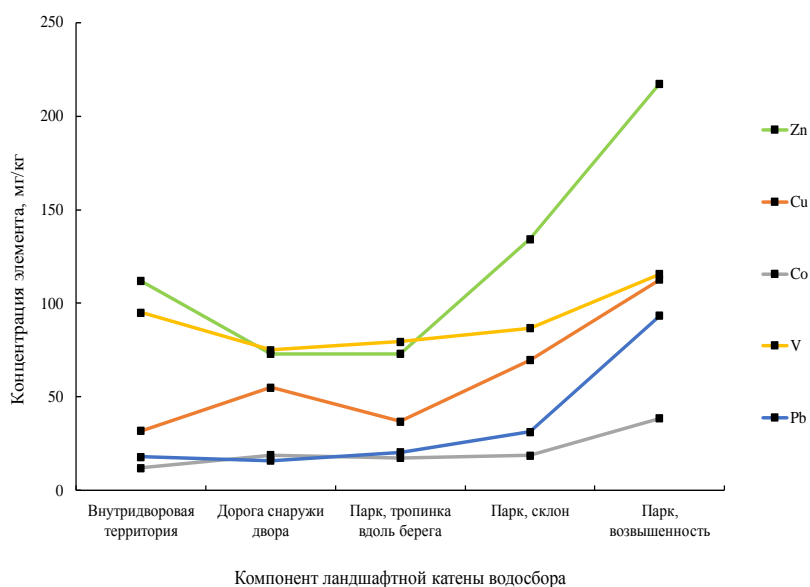
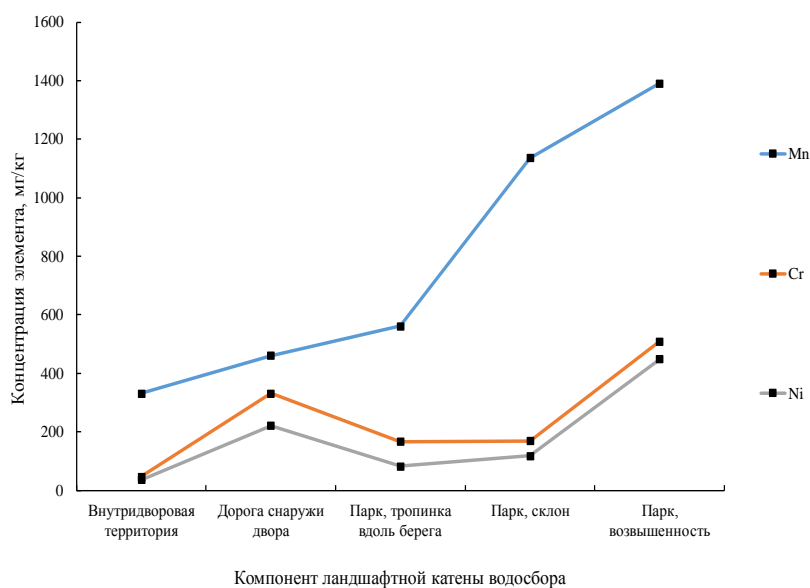


Рисунок 2. Содержание элементов в компонентах ландшафтной катены водосбора озера в Харитоновском саду (средняя концентрация)

Figure 2. The content of elements in the components of the landscape catena of the catchment area of the lake in the Kharitonovsky garden (average concentration)

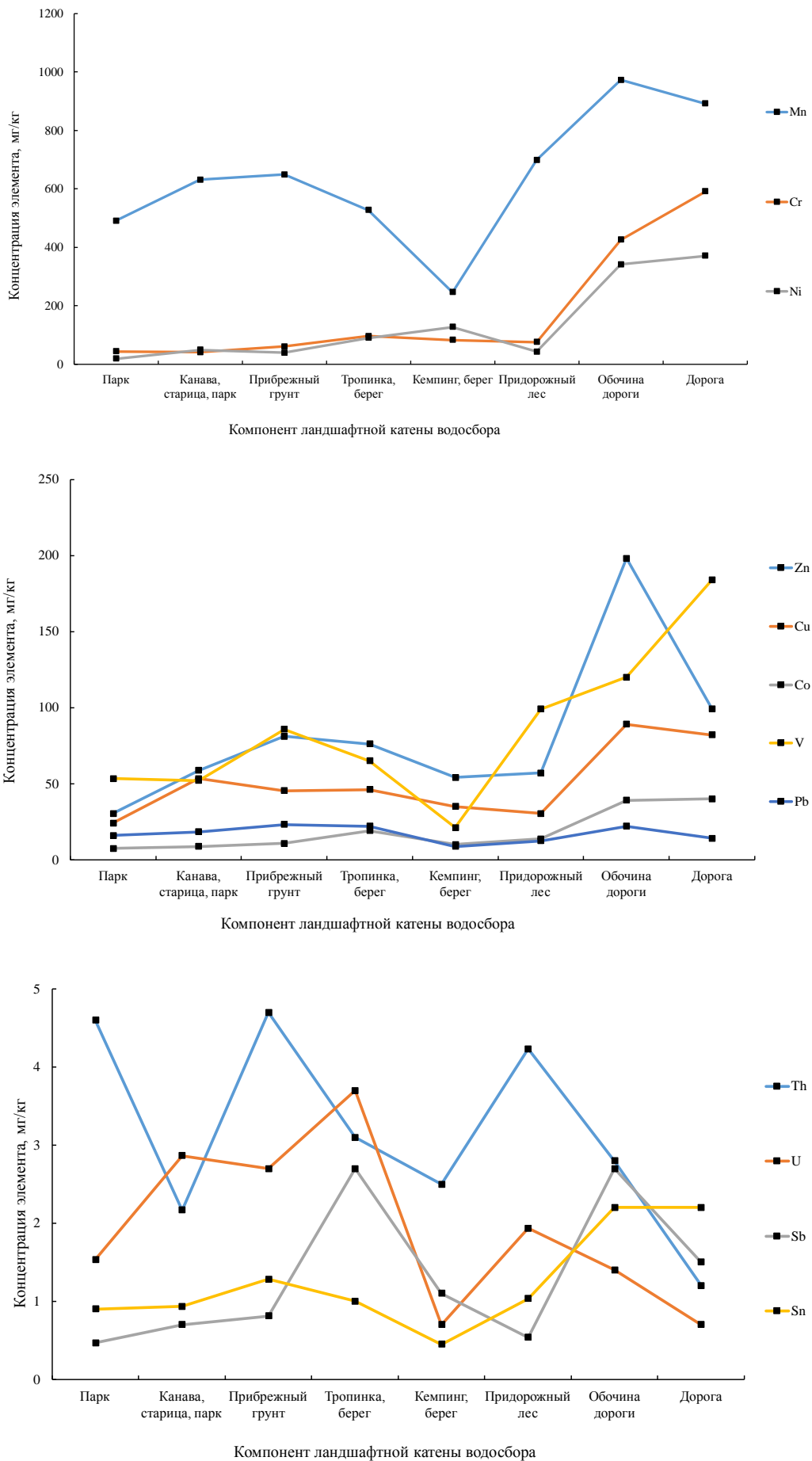


Рисунок 3. Содержание элементов в компонентах ландшафтной катены водосбора озера Чемоданчик (средняя концентрация)

Figure 3. The content of elements in the components of the landscape catena of the catchment area of Lake Chemodanchik (average concentration)

ками породы). Из отобранных проб методом квартования получены представительные: навеска для гранулометрического анализа массой 250 г; навеска для определения элементного состава массой до 50 г.

В зимний период на водоеме в Харитоновском саду и на оз. Чемоданчик отбирались колонки донных отложений. Отбор колонок проводился пробоотборником по типу желонки [22]. Пробы донных отложений отбирались согласно ГОСТ 17.1.5.01–80, Методике изучения биогеоценозов внутренних водоемов и Методическим рекомендациям по

геохимической оценке загрязнения поверхностных водотоков химическими элементами. Колонка донных отложений нарезалась на пробы со стратификацией по 4 см, пробы упаковывались в полиэтиленовые пакеты с исключением поступления воздуха. Образцы донных отложений высушивались при комнатной температуре.

Вещественный анализ проб. Гранулометрический анализ проб с водосборов проводился сухим ситовым разделением материала на фракции: < 0,04 мм, 0,04–0,1 мм, 0,1–1 мм и 1–3 мм (соответственно мелкая и средняя

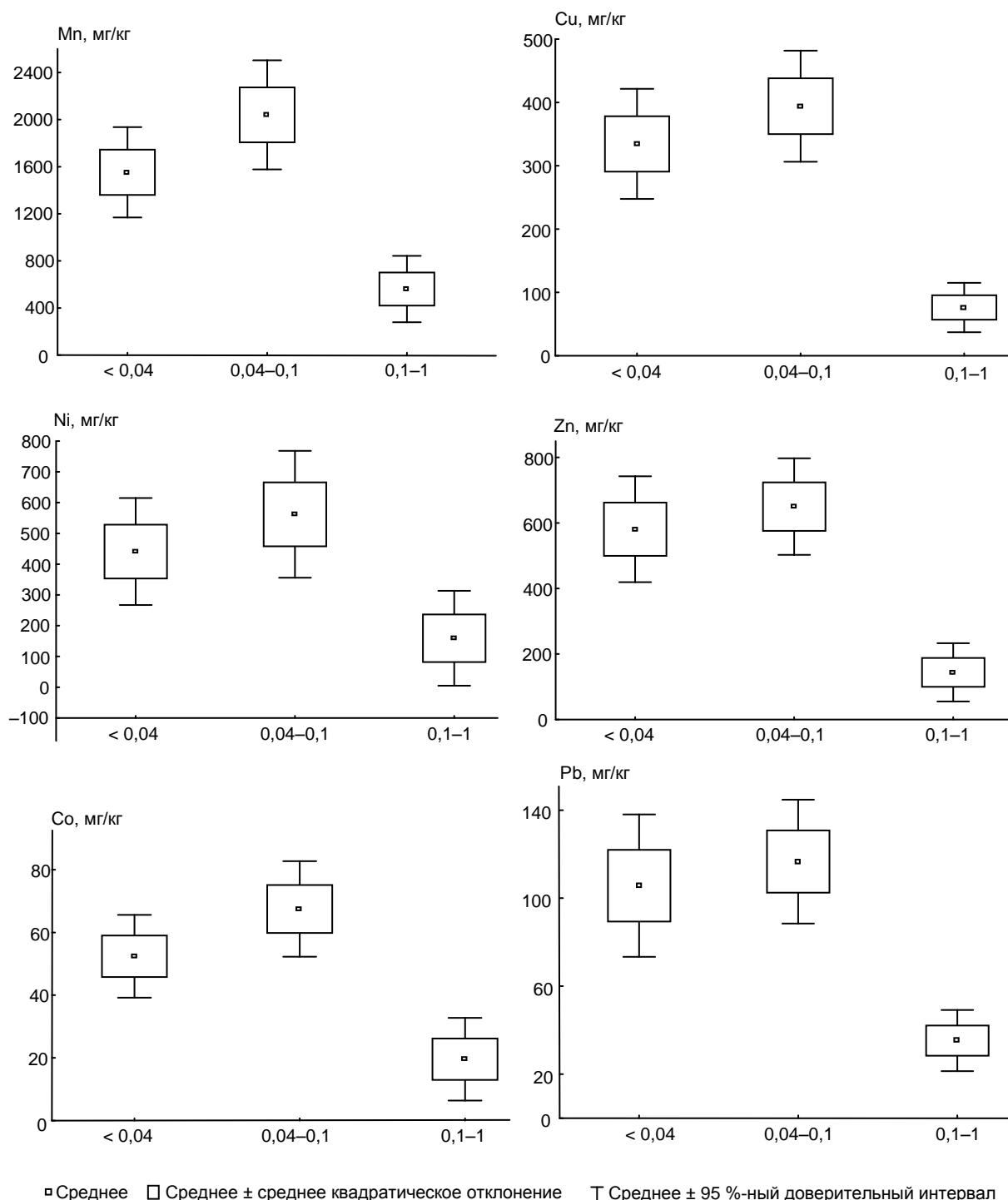


Рисунок 4. Распределение концентрации элементов в компонентах ландшафтной катены водосбора озера в Харитоновском саду и озера Чемоданчик по гранулометрическим фракциям

Figure 4. Distribution of the concentration of elements in the components of the landscape catena of the catchment area of the lake in the Kharitonovsky Garden and Lake Chemodanchik by granulometric fractions

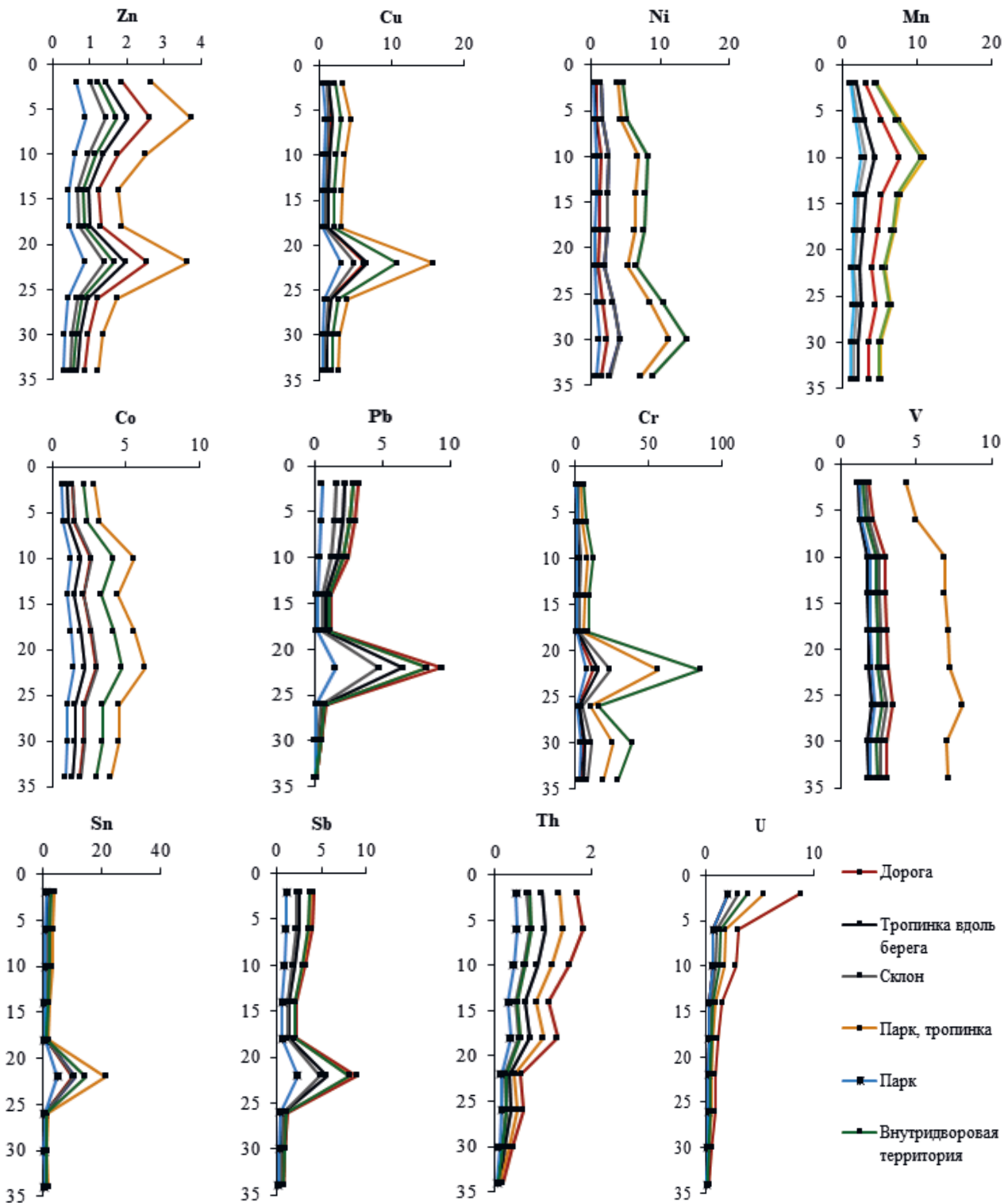


Рисунок 5. Обогащение элементами донных отложений водоема Харитоновского сада относительно транзитных компонентов катены водосбора. По оси абсцисс показана кратность обогащения элементом (количество раз), по оси ординат – глубина донных отложений (сантиметры)
Figure 5. Enrichment in elements of bottom sediments of the Kharitonovsky Garden reservoir relative to the transit components of the catchment area catena. The abscissa shows the enrichment ratio of the element (number of times), the ordinate shows the depth of bottom sediments (centimeters)

пыль, крупная пыль и мелкий песок, песчаная и грубая фракция, представленная в основном обломками породы). Химический анализ проводился на базе ЦКП «Геоаналитик» ИГГ УрО РАН. Определение элементного состава проб проводилось методом масс-спектрометрии с ин-

дуктивно связанной плазмой на масс-спектрометре ELAN 9000 фирмы Perkin Elmer (США) согласно Методике определения элементного состава почв, грунтов и донных отложений атомно-эмиссионным и масс-спектральным методами анализа НСАМ № 499-Х.

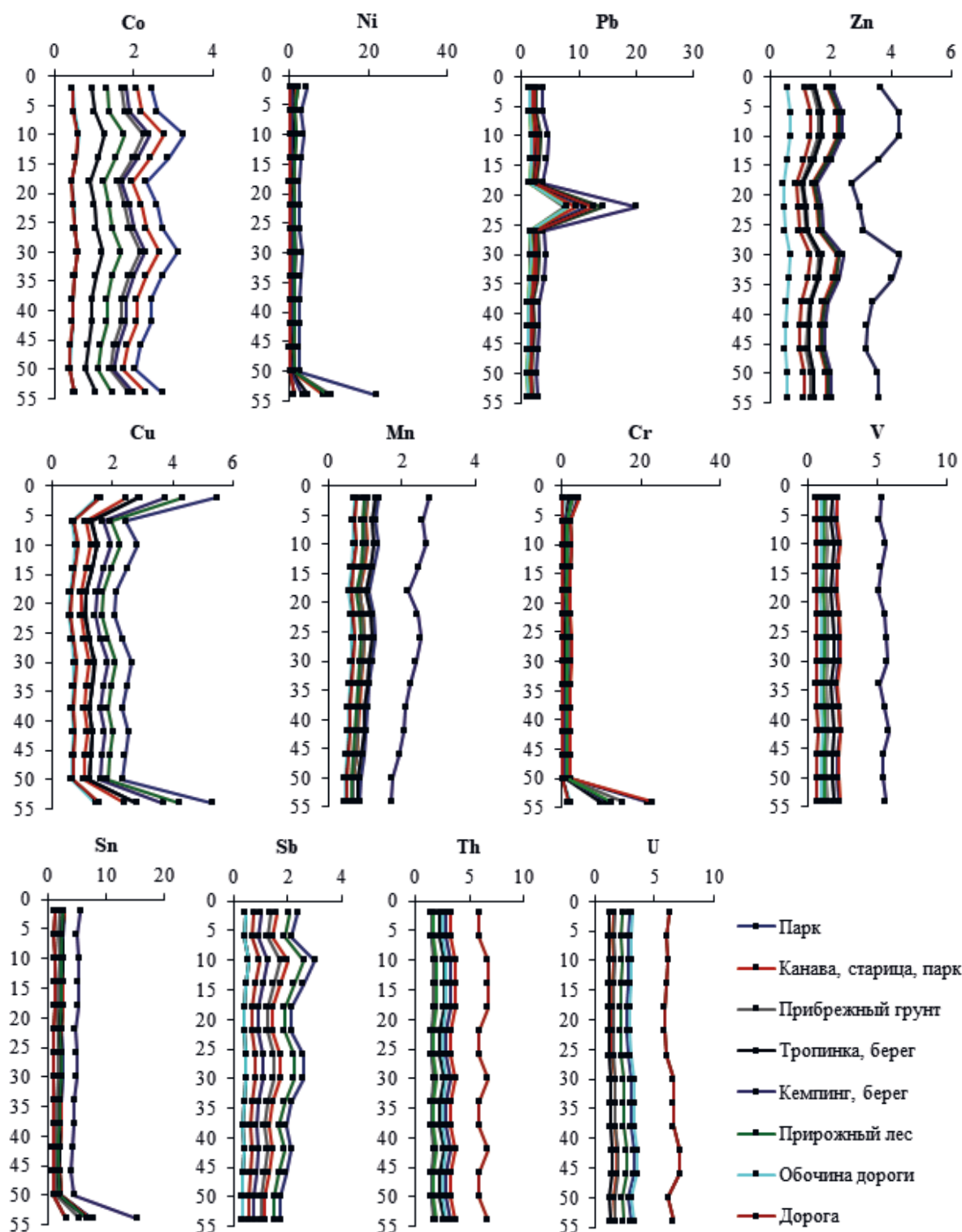


Рисунок 6. Обогащение элементами донных отложений водоема Чегоданчик относительно транзитных компонентов катены водосбора. По оси абсцисс показана кратность обогащения элементом (количество раз), по оси ординат – глубина донных отложений (сантиметры)

Figure 6. Enrichment with elements of bottom sediments of the Chemodanchik reservoir in relation to the transit components of the catchment area catena. The abscissa shows the enrichment ratio of the element (number of times), the ordinate shows the depth of bottom sediments (centimeters)

Результаты

Результаты опробования. На водосборе озера Чегоданчик отобрано 19 проб. На водосборе озера в Харитоновском саду 10 проб. Точки отбора проб на водосборах показаны на картосхемах на рис. 1. На водоемах было

отобрано 13 колонок с донными отложениями, при разделении по стратификации по 4 см получено 123 пробы донных отложений.

Распределение концентрации элементов в катене водосбора. На рис. 2, 3 представлены распределения

содержания элементов между функциональными ландшафтными зонами в катенах водосборов озера в Харитоновском саду и озера Чемоданчик соответственно. Для элементов из разных ассоциаций (например, поллютантов Pb, Zn и Cu или петрогенной) наблюдаются разные виды распределения концентраций в трансект-катене от внутриводосборной территории к прибрежным грунтам в парке. В водосборах наибольшие концентрации Pb, Zn и Cu наблюдаются в почвах на озелененных участках газонов, в парках и придорожной зоне. Схожий паттерн показывают распределения концентраций Pb, Zn и Cu (относящихся к главным потенциально опасным металлам-загрязнителям в городской среде). Однако паттерн распределения Co, Ni и Mn в компонентах ландшафтной катены водосборов отличается от паттерна потенциально опасных элементов.

Распределение концентраций металлов по гранулометрическому составу в компонентах катены. Распределение концентраций металлов по гранулометрическим фракциям показано на рис. 4. Наблюдается значимое обогащение пылевых фракций < 0,1 мм элементами типоморфной и антропогенной ассоциаций в компонентах водосборов озера Чемоданчик и озера в Харитоновском саду относительно мелкопесчаной фракции 0,1–1 мм. В компонентах катен обогащение достигает для Pb, Zn и Cu до 4 раз, для Ni Mn и Co до 6 раз.

Накопление металлов в донных отложениях. Кратность накопления элементов в слоях донных отложений относительно ландшафтных участков катен водосборов озера в Харитоновском саду и озера Чемоданчик соответственно показана на рис. 5, 6. Величина рассчитывалась как отношение средней концентрации элемента в донных отложениях к средней концентрации в ландшафтном участке. Накопление Pb, Zn и Cu в донных отложениях наблюдается до нескольких раз относительно компонентов ландшафтной катены водосбора.

Обсуждение

Распределение концентрации элементов в катене водосбора. По результатам анализа проб компонентов окружающей среды концентрации элементов имеют высокую вариабельность среди ландшафтных участков водосборов в городе. Вариабельность обусловлена связанностью ландшафтных функциональных зон, неоднородностью поверхностей в трансект-катене. Значительное накопление Zn и Cu происходит в придорожных почвах и грунтах, в материале дорожной пыли, что может говорить об автотранспорте как основном источнике поступления этих элементов. Источником Zn и Cu могут быть трущиеся детали и механизмы автомобилей (тормозные колодки и диски), а источником Pb в компонентах ландшафта – продукты сгорания этилированного бензина, до сих пор остающиеся в грунтах и почвах со времен его использования (этилированный бензин запретили в 1997 г.). После запрета этилированного бензина поступление свинца практически прекратилось, современное распределение концентраций свинца по функциональным участкам ландшафта отражает процесс миграции свинца в окружающей среде.

Следует отметить, что концентрации металлов Pb, Zn и Cu в большинстве компонентов окружающей среды трансект-катен ниже или сопоставимы с фоновыми, определенными для селитебных зон Екатеринбурга ранее [23]; тем не менее

остаются ландшафтные участки, которые имеют высокие концентрации элементов. С помощью подхода трансект-катен можно наблюдать градиент накопления в компонентах окружающей среды и латерального смыва металлов на функциональных участках водосбора. Более высокие концентрации петрогенных элементов (Ni, Co и Mn) наблюдаются в ненарушенных компонентах ландшафта (почвы парковой зоны) и антропогенно сформированных (дорога и ее обочина). Источники элементов типоморфной ассоциации в компонентах ландшафта естественного происхождения и искусственно сформированных на территории г. Екатеринбурга одни и те же. Материал литогенного субстрата Екатеринбурга и окрестностей используется в строительстве, в том числе в дорожном. При латеральном смыве вещества происходит обеднение компонентов ландшафта элементами типоморфной и антропогенной ассоциаций и перенос их в локальный базис эрозии.

Гранулометрический состав. Функциональные участки трансект-катены на водосборах связаны друг с другом, вследствие этого происходит поступление на один участок ландшафта седиментационного материала с соседних. Значительное количество пылевого материала формируется в водосборе на участках с плохим покрытием: внутри кварталов это участки грунтов, кучи стройматериалов, газоны с низким проективным покрытием травами и незапечатанные почвы. Пылевой материал формируется на автодорогах и затем переносится на колесах автотранспорта. Также пылевые частицы переносятся в результате стока атмосферных осадков в результате склоновых процессов в парковой зоне города. Распределение по гранулометрическим фракциям концентраций элементов в водосборах урбанизированной территории соответствует полученному ранее распределению металлов по гранулометрическим фракциям в компонентах селитебной зоны города [24]. На пылевых частицах в водоем попадает значительная часть седиментационного материала с водосбора.

Накопление металлов в донных отложениях. Максимальные кратности накопления элементов Pb, Zn и Cu в водоеме Харитоновского парка наблюдаются в горизонте донных отложений 20–24 см. Этот горизонт примерно соответствует времени формирования около чернобыльских выпадений, что может быть подтверждено по содержанию техногенного радиоактивного изотопа цезий-137 в отложениях [22]. Cs-137, Pb, Zn и Cu поступали в виде атмосферных выпадений, а также в составе материала наносов при эрозии верхнего слоя грунта в водоем. Накопление элементов различных ассоциаций в донных отложениях происходило в разное время их формирования.

Обогащение донных отложений петрогенными элементами (в частности Ni) показательно. В более низких горизонтах донных отложений обогащение Ni увеличивается в обоих водоемах, по-видимому, это связано с тем, что там отложения представлены в основном материалом литогенного субстрата, или же в случае искусственного формирования водоемов дно отсыпалось строительными материалами (что подтверждается визуально при отборе проб донных отложений).

Анализ кратности накопления элементов позволяет заключить, что основным механизмом переноса элементов в системе «водоем и его водосбор» является очищение склоновых ландшафтов за счет современных седимента-

ционных процессов и плоскостного смыва частиц (эрозия верхнего слоя грунтов), а также выпадения из атмосферы. При этом в системе «водоем и его водосбор» кратность накопления элементов в отдельных горизонтах донных отложений водоемов может достигать десяти раз относительно разных участков водосбора.

Заключение

Проведенное эколого-геохимическое исследование системы «водоем и его водосбор» с использованием бассейнового принципа показало различные виды распре-

ления концентраций элементов техногенной и петрогенной ассоциаций в компонентах водосбора. Распределения концентраций показывают тенденцию переноса вещества различного происхождения из компонентов ландшафта латеральными миграционными потоками в локальный базис денудации (бессточный поверхностный водоем). При этом в донных отложениях водоема происходит многократное накопление как поллютантов, так и элементов типоморфной ассоциации. Пылевые фракции являются основной транспортирующей веществом средой в водосборах.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 19-35-60011. Лабораторные анализы проведены с использованием оборудования ЦКП «Геоаналитик» ИГГ УрО РАН. Дооснащение и комплексное развитие ЦКП «Геоаналитик» ИГГ УрО РАН осуществляется при финансовой поддержке Минобрнауки РФ, соглашение № 075-15-2021-680. Работа Окуновой Т. Г. поддержана государственным заданием ИГГ УрО РАН, тема № ААА-А-А18-118053090045-8.

Вклад авторов: Окунова Т. Г. и Киселева Д. В. – проведение элементного анализа; Селезнев А. А. – концептуализация, обработка и анализ данных, разработка методологии, полевые исследования, написание текста статьи, подготовка рисунков и таблиц; Ярмошенко И. В. и Малиновский Г. П. – полевые исследования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Förstner U., Heise S., Schwartz R., Westrich B., Ahlf W. Historical contaminated sediments and soils at the river basin scale. Examples from the Elbe River catchment area // *Journal Soils & Sediments*. 2004. № 4 (4). P. 247–260. <https://doi.org/10.1007/BF02991121>
2. Папина Т. С. Транспорт и особенности распределения тяжелых металлов в ряду: вода–взвешенное вещество–донные отложения речных экосистем: аналит. обзор. Новосибирск: ИВЭП СО РАН, 2001. 58 с.
3. Янин Е. П. Техногенные речные илы (вещественный состав, геохимические особенности, экологическая оценка). М.: ВИНТИ, 2013. 196 с.
4. Слукровский З. И., Ильмаст Н. В., Суховская И. В., Борвинская Е. В., Гоголев М. А. Геохимическая специфика процесса современного осадконакопления в условиях техногенеза (на примере оз. Ламба, Петрозаводск, Карелия) // *Труды Карельского научного центра РАН*, 2017. № 10. С. 45–63. <https://doi.org/10.17076/lim618>
5. Dauval'ter V. A., Kashulin N. A. Mercury Pollution of Lake Imandra Sediments, the Murmansk Region, Russia // *International Journal of Environmental Research*. 2018. Vol. 12(6). P. 939–953. <https://doi.org/10.1007/s41742-018-0149-0>
6. Павлова А. С., Кашулин Н. А., Денисов Д. Б., Терентьев П. М., Кашулина Т. Г., Даувальтер В. А. Распределение химических элементов между компонентами экосистемы арктического озера Большой Вудъявр (Хибины, Мурманская область) // *Сибирский экологический журнал*. 2019. № 3. С. 348–366. <https://dx.doi.org/10.15372/SEJ20190311>
7. Remor M. B., Sampaio S. C., de Rijk S., Boas M. A. V., Gotardo J. T., Pinto E. T., Schardong F. A. Sediment geochemistry of the urban Lake Paulo Gorski // *International Journal of Sediment Research*. 2018. Vol. 33. Issue 4. P. 406–414. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2018.04.009>
8. Shi X., Sang L., Wang X. C., Jin P. Pollutant exchange between sewage and sediment in urban sewer systems // *Chemical Engineering Journal*. 2018. Vol. 351. P. 240–247. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.06.096>
9. Wang W., Bai J., Zhang G., Jia J., Wang X., Liu X., Cui B. Occurrence, sources and ecotoxicological risks of polychlorinated biphenyls (PCBs) in sediment cores from urban, rural and reclamation-affected rivers of the Pearl River Delta, China // *Chemosphere*. 2019. Vol. 218. P. 359–367. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.11.046>
10. Янин Е. П. Формы нахождения тяжелых металлов в техногенных речных илах // *Разведка и охрана недр*. 2016. № 11. С. 54–59.
11. Дрюпина Е. Ю., Эйрих А. Н., Эйрих С. С., Папина Т. С. Пространственно-временная динамика содержания загрязняющих веществ в коммунальных и смешанных сточных водах Барнаула // *Известия Алтайского государственного университета*. 2014. № 3-1(83). С. 182–187. [https://doi.org/10.14258/izvasu\(2014\)3.1-33](https://doi.org/10.14258/izvasu(2014)3.1-33)
12. Шешнев А. С. Сезонная динамика химического состава вод овражно-балочных систем городских территорий (на примере Саратова) // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2020. Т. 331. № 7. С. 7–14. <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/7/2714>
13. Chin A. Urban transformation of river landscapes in a global context // *Geomorphology*. 2006. Vol. 79. Issues 3–4. P. 460–487. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.06.033>
14. Seleznev A. A., Yarmoshenko I. V. Study of urban puddle sediments for understanding heavy metal pollution in an urban environment // *Environmental Technology & Innovation*. 2014. Vol. 1–2. P. 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2014.08.001>
15. Crosby C. J., Fullen M. A., Booth C. A., Searle D. E. A dynamic approach to urban road deposited sediment pollution monitoring (Marylebone Road, London, UK) // *Journal of Applied Geophysics*. 2014. Vol. 105. P. 10–20. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2014.03.006>
16. Amato F., Pandolfi M., Escrig A., Querol X., Alastuey A., Pey J., Perez N., Hopke P.K. Quantifying road dust resuspension in urban environment by Multilinear Engine: A comparison with PMF2 // *Atmospheric Environment*. 2009. Vol. 43. Issue 17. P. 2770–2780. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.02.039>
17. Chen J., Wang W., Liu H., Ren L. Determination of road dust loadings and chemical characteristics using resuspension // *Environmental Monitoring and Assessment*. 2012. Vol. 184. P. 1693–1709. <https://doi.org/10.1007/s10661-011-2071-1>
18. Varrica D., Dongarrà G., Sabatino G., Monna F. Inorganic geochemistry of roadway dust from the metropolitan area of Palermo, Italy // *Environmental Geology*. 2003. Vol. 44. P. 222–230. <https://doi.org/10.1007/S00254-002-0748-Z>
19. Seleznev A., Rudakov M. Some geochemical characteristics of puddle sediments from cities located in various geological, geographic, climatic and industrial zones // *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*. 2019. Vol. 14. No. 1. P. 95–106. <https://doi.org/10.26471/cjees/2019/014/062>
20. Seleznev A. A., Yarmoshenko I. V., Malinovsky G. P. Assessment of Total Amount of Surface Sediment in Urban Environment Using Data on Solid Matter Content in Snow-Dirt Sludge // *Environmental Processes*. 2019. Vol. 6. P. 581–595. <https://doi.org/10.1007/s40710-019-00383-w>
21. Устинов М. Т. Катенография и эколого-мелиоративная оценка почвенного покрова методом трансект-катен // *Сибирский экологический журнал*. 2001. Т. 8. № 3. С. 285–291.
22. Селезнев А. А., Рясная А. Д., Окунова Т. Г., Ярмошенко И. В., Малиновский Г. П. Геохимические характеристики компонентов окружающей среды водосборов и малых водоемов урбанизированной среды // *Геология, география и глобальная энергия*. 2022. № 3(86). С. 137–156. https://doi.org/10.54398/20776322_2022_3_137
23. Seleznev A. A., Yarmoshenko I. V., Sergeev A. P. ¹³⁷Cs in puddle sediments as timescale tracer in urban environment // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2015. Vol. 142. P. 9–13. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2015.01.001>
24. Селезнев А. А. Тяжелые металлы в поверхностном грязевом осадке города Екатеринбурга // *Известия УГГУ*. 2018. Вып. 1(49). С. 46–54. <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2018-1-46-54>

Статья поступила в редакцию 22 ноября 2022 года

Distribution and accumulation of heavy metals in the catchment catenary complex and bottom sediments of the water body in an urban environment

Andrian Anatol'evich SELEZNEV^{1*}

Tat'yana Gennad'evna OKUNEVA^{3**}

Il'ya Vladimirovich YARMOSHENKO^{2***}

Georgiy Petrovich MALINOVSKIY^{2****}

Gar'ya Vladimirovna KISELEVA^{1,3*****}

¹Ural Federal University name after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

²Institute of Industrial Ecology of the Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russia

³The Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russia

Abstract

Problem Statement. The pollutant intake into water bodies is one of the issues of urban areas. The pollutant input from the residential area of the city with surface runoff can many times exceed the input of pollutants from industrial and recreational areas, as well as from point pollutant sources.

The objective of the study is 1) assess the distribution of chemical elements in catchments of water bodies in an urbanised area, 2) accumulation of chemical elements in solid matter of bottom sediments of surface water bodies with catchments in the functional areas of the city, 3) identify the main mechanisms of transfer of elements in solid matter from catchments to water bodies. The study was conducted on the example of Ekaterinburg (Russia).

The material for the study consisted of the results of a landscape environmental and geochemical survey carried out in the city area in 2019–2021.

Results. The distributions of element concentrations between functional landscape zones in the catenaries of the Kharitonovsky Garden and Chemodanchik reservoir catchments in Ekaterinburg were obtained. The distributions of metal concentrations in the catchment components show a tendency for the transfer of substance of different origin from the landscape components by lateral migration flows to the local basis of denudation (a drainless surface water body). At the same time in the bottom sediments of the reservoir there is a multiple accumulation of both pollutants and elements of typomorphic association. Dust fractions are the main carrier of contaminants in catchments.

Keywords: urban environment, waterbody, catchment, catena, metals.

This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, grant no. 19-35-60011. Laboratory analyzes were carried out using the equipment of the Common Use Center Geoanalyst of the IGG UB of the Russian Academy of Sciences. The retrofitting and comprehensive development of the Common Use Center Geoanalyst of the IGG UB of the Russian Academy of Sciences is carried out with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, agreement No. 075-15-2021-680. The work of T. G. Okuneva was supported by the state task of the IGG UB of the Russian Academy of Sciences, topic No. AAAA-A18-118053090045-8.

REFERENCES

1. Förstner U., Heise S., Schwartz R., Westrich B., Ahlf W. 2004, Historical contaminated sediments and soils at the river basin scale. Examples from the Elbe River catchment area. *Journal Soils & Sediments*, no. 4 (4), pp. 247–260. <https://doi.org/10.1007/BF02991121>
2. Papina, T. S. 2001, Transport and features of the distribution of heavy metals in the series: water–suspended matter–bottom sediments of river ecosystems: analyt. review. Novosibirsk, 58 p. (*In Russ.*)
3. Yanin E. P. 2013, Technogenic river silts (material composition, geochemical features, environmental assessment). Moscow, 196 p. (*In Russ.*)
4. Slukovsky Z. I., Ilmast N. V., Sukhovskaya I. V., Borvinskaya E. V., Gogolev M. A. 2017, The geochemical specifics of modern sedimentation processes on the bottom of a small lake Lamba under technogenic impact. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN* [Proceedings of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], no. 10, pp. 45–63. (*In Russ.*) <https://doi.org/10.17076/lm618>
5. Dauval'ter V. A., Kashulin N. A. 2018, Mercury Pollution of Lake Imandra Sediments, the Murmansk Region, Russia. *International Journal of Environmental Research*, vol. 12 (6), pp. 939–953. (*In Russ.*) <https://doi.org/10.1007/s41742-018-0149-0>
6. Pavlova A. S., Kashulin N. A., Denisov D. B., Terentiev P. M., Kashulina T. G., Dauval'ter V. A. 2019, Distribution of chemical elements between the components of the ecosystem of arctic lake Bolshoy Vud'yavr (Khibiny, Murmansk oblast). *Sibirskiy ekologicheskiy zhurnal* [Siberian Ecological Journal], no. 3, pp. 348–366. (*In Russ.*) <http://dx.doi.org/10.15372/SEJ20190311>
7. Remor M. B., Sampaio S. C., de Rijk S., Boas M. A. V., Gotardo J. T., Pinto E. T., Schardong F. A. 2018, Sediment geochemistry of the urban Lake Paulo Gorski. *International Journal of Sediment Research*, vol. 33, issue 4, pp. 406–414. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2018.04.009>

✉ sandrian@rambler.ru

**okunevatatjana@mail.ru

***ivy@ecko.uran.ru

****georgiy@ecko.uran.ru

*****podarenka@mail.ru

8. Shi X., Sang L., Wang X. C., Jin P. 2018, Pollutant exchange between sewage and sediment in urban sewer systems. *Chemical Engineering Journal*, vol. 351, pp. 240–247. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.06.096>
9. Wang W., Bai J., Zhang G., Jia J., Wang X., Liu X., Cui B. 2019, Occurrence, sources and ecotoxicological risks of polychlorinated biphenyls (PCBs) in sediment cores from urban, rural and reclamation-affected rivers of the Pearl River Delta, China. *Chemosphere*, vol. 218, pp. 359–367. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.11.046>
10. Yanin E. P. 2016, The department of heavy metals in technogenic silts of the river. *Razvedka i okhrana nedr* [Prospect and protection of mineral resources], no. 11, pp. 54–59. (In Russ.)
11. Dryupina E. Yu., Eirikh A. N., Eirikh S. S., Papina T. S. 2014, Spatiotemporal dynamics of pollutants content in municipal and mixed wastewaters of Barnaul. *Izvestiya Altayskogo gosudarstvennogo universiteta* [News of the Altai State University], no. 3-1 (83), pp. 182–187. (In Russ.) [https://doi.org/10.14258/izvasu\(2014\)3.1-33](https://doi.org/10.14258/izvasu(2014)3.1-33)
12. Sheshnev A. S. 2020, Seasonal dynamics of chemical composition of waters from gully systems in urban areas (by the example of Saratov). *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov* [Bulletin of the Tomsk polytechnic university. Geo assets engineering], vol. 331, no. 7, pp. 7–14. (In Russ.) <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/7/2714>
13. Chin A. 2006, Urban transformation of river landscapes in a global context. *Geomorphology*, vol. 79, issues 3–4, pp. 460–487. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.06.033>
14. Seleznev A. A., Yarmoshenko I. V. 2014, Study of urban puddle sediments for understanding heavy metal pollution in an urban environment. *Environmental Technology & Innovation*, vol. 1–2, pp. 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2014.08.001>
15. Crosby C. J., Fullen M. A., Booth C. A., Searle D. E. 2014, A dynamic approach to urban road deposited sediment pollution monitoring (Marylebone Road, London, UK). *Journal of Applied Geophysics*, vol. 105, pp. 10–20. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2014.03.006>
16. Amato F., Pandolfi M., Escrig A., Querol X., Alastuey A., Pey J., Perez N., Hopke P.K. 2009, Quantifying road dust resuspension in urban environment by Multilinear Engine: A comparison with PMF2. *Atmospheric Environment*, vol. 43, issue 17, pp. 2770–2780. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.02.039>
17. Chen J., Wang W., Liu H., Ren L. 2012, Determination of road dust loadings and chemical characteristics using resuspension. *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 184, pp. 1693–1709. <https://doi.org/10.1007/s10661-011-2071-1>
18. Varrica D., Dongarrà G., Sabatino G., Monna F. 2003, Inorganic geochemistry of roadway dust from the metropolitan area of Palermo, Italy. *Environmental Geology*, vol. 44, pp. 222–230. <https://doi.org/10.1007/S00254-002-0748-Z>
19. Seleznev A., Rudakov M. 2019, Some geochemical characteristics of puddle sediments from cities located in various geological, geographic, climatic and industrial zones. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, vol. 14, no. 1, pp. 95–106. <https://doi.org/10.26471/cjees/2019/014/062>
20. Seleznev A. A., Yarmoshenko I. V., Malinovsky G. P. 2019, Assessment of Total Amount of Surface Sediment in Urban Environment Using Data on Solid Matter Content in Snow-Dirt Sludge. *Environmental Processes*, vol. 6, pp. 581–595. <https://doi.org/10.1007/s40710-019-00383-w>
21. Ustinov M. T. 2001, Catenography and ecological and reclamation assessment of the soil cover by the transect-caten method. *Sibirskiy ekologicheskiy zhurnal* [Siberian Ecological Journal], vol. 8, no. 3, pp. 285–291. (In Russ.)
22. Seleznev A. A., Ryanskaya A. D., Okuneva T. G., Yarmoshenko I. V., Malinovsky G. P. 2022, Geochemical characteristics of the environmental components of catchments and small water bodies in an urban environment. *Geologiya, geografiya i global'naya energiya* [Geology, geography and global energy], no. 3 (86), pp. 137–156. (In Russ.) https://doi.org/10.54398/20776322_2022_3_137
23. Seleznev A. A., Yarmoshenko I. V., Sergeev A. P. 2015, ¹³⁷Cs in puddle sediments as timescale tracer in urban environment. *Journal of Environmental Radioactivity*, vol. 142, pp. 9–13. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2015.01.001>
24. Seleznev A. A. 2018, Heavy metals in surface mud sediment in Ekaterinburg (Russia). *Izvestiya UGGU* [News of the Ural State Mining University], issue 1 (49), pp. 46–54. (In Russ.) <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2018-1-46-54>

The article was received on November 22, 2022

Выявление карста геофизическими методами с применением микросейсмических зондирований

Вадим Анатольевич ДАВЫДОВ*

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

Аннотация

Цель работы – опробование методики обнаружения погребенного карста с помощью микросейсмических зондирований, базирующихся на спектральном усилении горизонтальных смещений. К основным задачам исследований относятся построение и анализ геоэлектрических и микросейсмических разрезов.

Методология. Регистрация микросейсмического фона осуществлялась с помощью автономной сейсмической станции ОМАР-2с (Институт геофизики УрО РАН, г. Екатеринбург) в полосе частот 1–1000 Гц. В качестве датчиков использовались низкочастотные горизонтальные сейсмоприемники фирмы OYO Geospace Corporation. Вертикальные электрические зондирования (ВЭЗ) проводились комплектом аппаратуры ЭРА-МАКС (НПП «ЭРА», г. Санкт-Петербург) с использованием симметричной установки Шлюмберже на частоте 4,88 Гц при токах 5–50 мА. Обработка ВЭЗ заключалась в количественной одномерной инверсии по программе IPI2Win (МГУ, г. Москва).

Результаты. Проведены опытно-методические работы по изучению микросейсм, сопровождаемые ВЭЗ, на двух закарстованных участках Свердловской области. По результатам обработки построены геоэлектрические и микросейсмические разрезы, позволяющие определить условия залегания коренных пород и покрывающих их рыхлых отложений, а также выделить локальные аномалии, связанные с проявлениями карста. Результаты электроразведки и сейсмометрии хорошо согласуются между собой и подтверждаются геологическими данными.

Выводы. Вертикальные электрические зондирования позволяют выделять карст по высокой контрастности сопротивлений вмещающих коренных пород (известняков) и терригенного материала-заполнителя (глины, суглинки). Микросейсмические зондирования дают возможность оконтурить карстовые зоны по высоким значениям спектрального усиления слабо консолидированных карстовых отложений относительно низкого уровня микросейсм в коренных породах. Таким образом, на основании комплексных электрических и микросейсмических зондирований можно уверенно идентифицировать области развития карстовых процессов.

Ключевые слова: микросейсмический фон, спектральное усиление, карст, тектоника, комплексные геофизические исследования, разрезы физических параметров.


Введение

Изучение закарстованных территорий с помощью геофизических методов применяется уже достаточно давно и успешно [1, 2]. Стоит упомянуть, что в некоторых регионах России с широким распространением карстовых процессов (Башкирия, Нижегородская область) применение геофизики при инженерных изысканиях под строительство является обязательным (ТСН 302-50-95 РБ, ТСН 22-308-98 НН). Основными методами исследований являются электроразведка и сейсморазведка, в некоторых случаях используют гравиразведку и каротаж скважин [3–6]. Появляются и отдельные сообщения по использованию пассивных сейсмических наблюдений при изучении карста [7, 8].

Уже достаточно давно подмечено существование связи амплитудных спектров микросейсмических колебаний с особенностями геологического разреза. Чтобы избавиться от мешающих факторов, используют нормализацию спектров через их отношения. Например, в методе Накамуры изучаются спектральные соотношения горизонтальных и вертикальных компонент ми-

кросейсм (Horizontal to Vertical Spectral Ratios – HVSR) в точке наблюдений [9]. Другим способом нормирования является отношение профильных наблюдений амплитудных спектров микросейсмического сигнала к измерениям на опорном пункте (ОП). Получаемая величина называется сейсмической реакцией грунта, или спектральным усилением [10]. При этом ОП устанавливается в районе развития «эталонных» грунтов, характеризующихся минимальной мощностью рыхлых отложений. Основной вклад в микросейсмический шум вносят поверхностные волны, имеющие как продольные, так и поперечные компоненты смещений. Зная скорости распространения сейсмических волн, можно строить разрезы спектрального усиления микросейсм для изучения глубинного строения и инженерных изысканий. Так, известен метод микросейсмических зондирований, базирующийся на использовании вертикальных составляющих микросейсм с преобладанием волн Релея [11, 12]. С нашей точки зрения, более инфор-

✉ davyde@yandex.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-2483-2154>

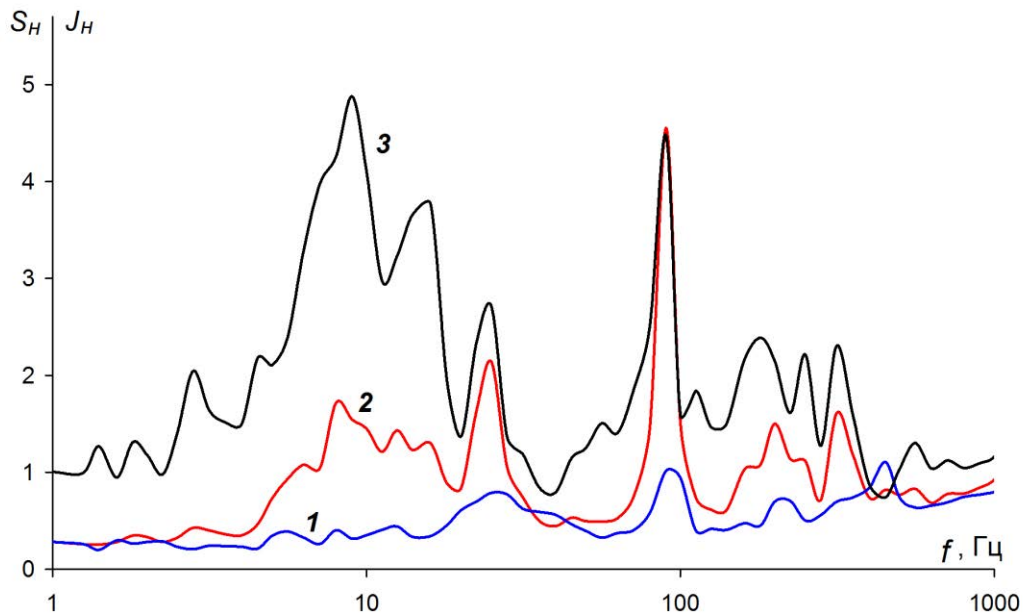


Рисунок 1. Спектры микросейсмических сигналов на эталонных грунтах (1), в зоне карста (2) и их спектральные отношения (3)
Figure 1. Spectra of microseismic signals on reference soils (1), in the karst zone (2) and their spectral ratios (3)

мативными являются горизонтальные компоненты микросейсм, в которых доминирующими являются волны Лява. Настоящая работа посвящена опробованию микросейсмических зондирований (МСЗ), базирующихся на спектральном усилении горизонтальных смещений, с целью обнаружения погребенного карста. К основным задачам исследований относятся построение и анализ геоэлектрических и микросейсмических разрезов.

Методика работ

Полевые наблюдения за микросейсмками проводились в полосе частот 1–1000 Гц. Регистрация микросейсмического фона осуществлялась с помощью автономной сейсмической станции ОМАР-2с, разработанной в Институте геофизики УрО РАН. В качестве датчиков использовались низкочастотные горизонтальные сейсмоприемники фирмы OYO Geospace Corporation. За счет схмотехнической частотной коррекции достигнута линейная амплитудно-частотная характеристика сейсмического тракта во всей области измерений. Обоснование и основные методические приемы наблюдений и обработки микросейсм уже описывались ранее [13], поэтому приведем только основополагающие моменты. На каждом пункте наблюдений станция приводилась в горизонтальное положение и ориентировались по сторонам света. После контроля по индикаторам уровня сигнала осуществлялась запись микросейсмического шума в течение 3–10 мин. Информация в реальном масштабе времени проходила аналого-цифровое преобразование и сохранялась во флэш-памяти цифрового регистратора в виде файла в импульсно-кодовой модуляции. По окончании работ полученные записи переписывались, редактировались и обрабатывались с помощью специального пакета программ. Амплитудные спектры и спектральные отношения сигналов (рис. 1) вычислялись с помощью быстрого преобразования Фурье.

Конечными результатами являлись значения спектрального усиления микросейсмических колебаний в горизонтальной плоскости:

$$J_H = S_H(f)_{\text{пк}} / S_H(f)_{\text{оп}},$$

где $S_H(f)_{\text{пк}}$ – спектр горизонтальных компонент микросейсм на пункте наблюдений; $S_H(f)_{\text{оп}}$ – спектр горизонтальных компонент микросейсм в опорном пункте; f – частота колебаний.

Для окончательного представления полученные результаты переводились из частотной области в диапазон глубин с построением сводных разрезов. Глубинность исследований определялась для модели резонирующего слоя на полупространстве, равняющейся четверти длины поперечной волны λ , как и в способе Накамуры (СП 283.1325800.2016):

$$h = \lambda/4 = v_s/4f,$$

где v_s – скорость поперечных волн;

Скорость поперечных волн приблизительно оценивалась по скорости распространения поверхностных волн Релея: $v_s \approx 1,07v_R$ с использованием вертикальных сейсмоприемников [14]. Более точно это можно сделать с помощью дисперсионных методов анализа, производящих инверсию и построение скоростных разрезов поперечных волн. К ним относятся: спектральный анализ поверхностных волн (Spectral Analysis of Surface Waves – SASW) [15], метод преломленных микросейсм (Refraction Microtremor – ReMi) [16] и многоканальный анализ поверхностных волн (Multichannel Analysis of Surface Waves – MASW) [17].

Опытно-методические работы по изучению микросейсм сопровождались вертикальными электрическими зондированиями (ВЭЗ). Электроразведочные работы классическим методом ВЭЗ выполнялись по стандартной методике [18]. Измерения проводились комплектом аппаратуры ЭРА-МАКС (НПП «ЭРА», г. Санкт-Петербург) с использованием симметричной установки Шлюмберже на частоте 4,88 Гц при токах 5–50 мА. Обработка ВЭЗ заключалась в количественной одномерной инверсии по программе IPI2Win, разработанной в МГУ. Результаты интерпретации зондирований экспортировались в файлы

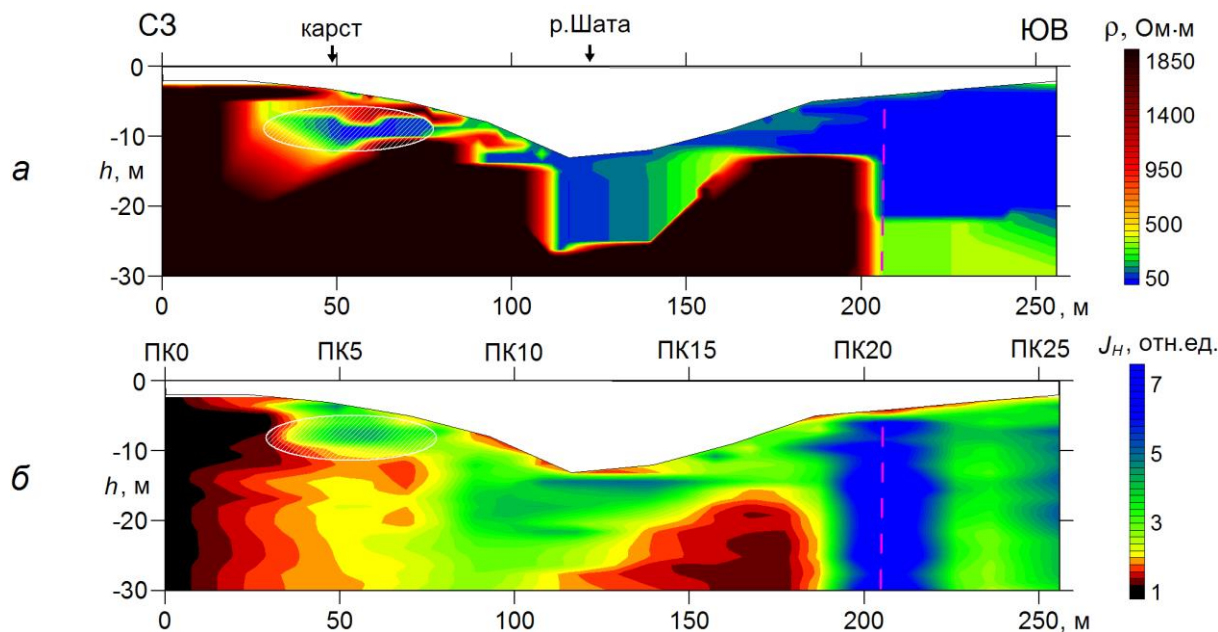


Рисунок 2. Результаты геофизических исследований в долине р. Шата: а – геоэлектрический разрез; б – микросейсмический разрез; заштрихованным овалом выделена карстовая полость, пунктирной линией – тектонический контакт

Figure 2. The results of geophysical studies in the valley of the Shata river: а – geoelectric section; б – microseismic section; the shaded oval highlights the karst cavity, the dotted line – tectonic contact

пространственных данных (гриды) для построения геоэлектрических разрезов.

Результаты исследований

Карст на реке Шата

Геофизические работы в долине р. Шата Сухоложского района Свердловской области проводились в составе инженерно-геологических изысканий под строительство теплотрассы. К задачам исследований относилось определение условий залегания коренных пород и покрывающих их рыхлых отложений, а также выявление изменений, вызванных процессами карстообразования (присутствие возможных карстовых пустот и зон разуплотнения грунтов). Все они возлагались на электроразведочные работы методом ВЭЗ, в помощь которым в качестве дополнительного метода были добавлены микросейсмические зондирования.

По геологическим данным участок работ располагается в зоне сочленения карстующихся рифогенных известняков и вулканогенных пород среднего девона с высокой степенью тектонической нарушенности. Карстовые образования в основном перекрыты поверхностными отложениями. Пустоты заполнены глиной, суглинком и другими терригенными породами. Основанием для выявления карста является значительная разница электрофизических свойств коренных карбонатных пород (известняков) и терригенного заполнителя. Удельные электрические сопротивления (УЭС) известняков составляют 1000–5000 Ом × м и более. УЭС осадочных пород лежат в пределах от 10–12 Ом × м (глины) до 100–400 Ом × м (пески). Результаты работ ВЭЗ позволили выделить две области залегания коренных пород с различными электрическими свойствами. В пределах высокоомных коренных пород, ассоциируемых с рифогенными известняками (ПК0–ПК20), выявлены аномально низкоомные зоны, связанные с карстом и речными отложениями (рис. 2, а).

Первая аномалия (ПК3–ПК8) наиболее полно соответствует представлению о карстовой полости: она изолирована со всех сторон высокоомными породами (1200–4300 Ом × м) и заполнена глиной (12 Ом × м). Следует отметить, что в районе пикетов ПК4–ПК6 в нескольких местах наблюдается просадка дневной поверхности в форме концентрических воронок, что подтверждает процессы карстообразования. Вторая низкоомная зона (ПК11–ПК16) соответствует аллювиальным суглинисто-песчаным (40–160 Ом × м) отложениям долины реки Шата. Между пикетами ПК20 и ПК21 наблюдается резкое изменение свойств геоэлектрического разреза, что говорит об изменении геологической обстановки. Мощность рыхлых отложений здесь увеличивается до 20 м, а УЭС коренных пород снижается до 300 Ом × м. Геологические данные и петрофизические свойства свидетельствуют о том, что в конце профиля (ПК21–ПК26) залегают туфы андезит-базальтового состава. Контакт между известняками и туфами в районе ПК21 выделяется на микросейсмическом разрезе аномально высокими значениями спектрального усиления J_n (рис. 2, б). Поскольку высокий уровень микросейсмических шумов характерен для разрывных нарушений, вероятнее всего, что контакт имеет тектоническую природу. Повышенный микросейсмический фон обычно наблюдается над слабо консолидированными грунтами, и карстовые отложения не являются исключением. Форма и положение погребенного карста довольно четко определяется аномалией спектрального усиления горизонтальных компонент микросейсм в том же месте, что и на геоэлектрическом разрезе. Палеодолина р. Шата выделяется на микросейсмическом разрезе схожим образом, но выглядит более широкой, чем на геоэлектрическом разрезе. Вероятно, кроме аллювиальных отложений, высокий уровень микросейсм присутствует и в примыкающих коренных породах, ослабленных в результате эрозионной

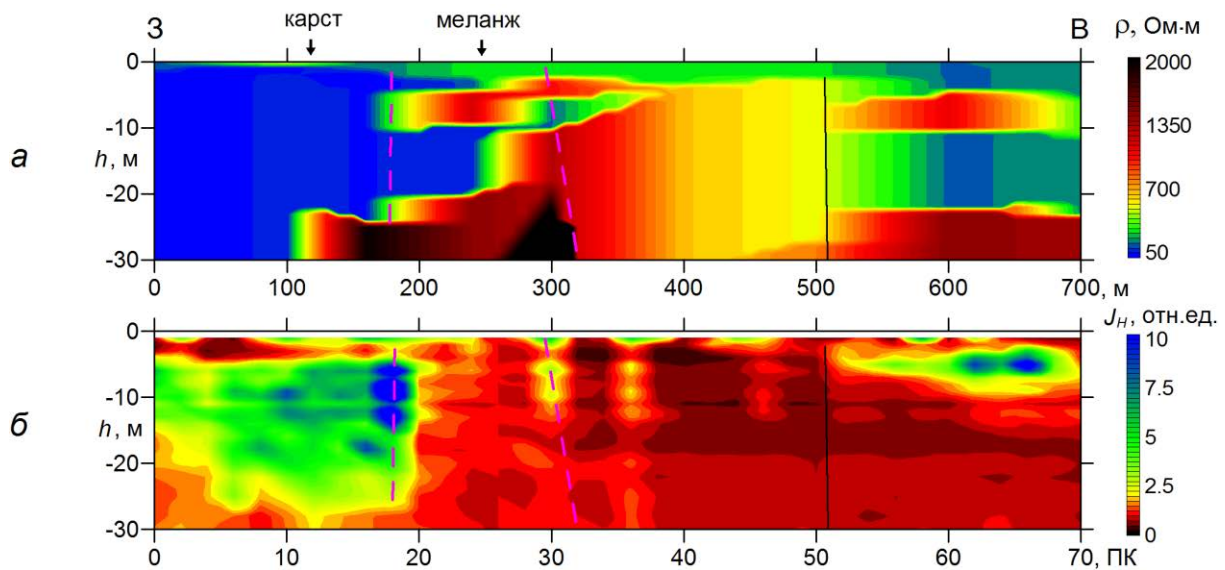


Рисунок 3. Результаты геофизических исследований на Крылатовском профиле: а – геоэлектрический разрез; б – микросейсмический разрез; пунктирными линиями выделены тектонические нарушения, сплошной линией – контакт горных пород
Figure 3. Results of geophysical studies on the Krylatov profile: а – geoelectric section; б – microseismic section; dotted lines indicate tectonic disturbances, solid line – contact of rocks

деятельности реки, русло которой ранее располагалось к северо-западу относительно современного положения. По результатам МСЗ геологические объекты на участке работ характеризуются следующими значениями спектрального усиления J_n : рифогенные известняки – 1–2; вулканические туфы – 2,5–3; аллювий – 2–5,5; карстовые отложения – 3–5; тектонический контакт – 6–8. В качестве референтных грунтов выступили коренные известняки, перекрытые метровым слоем рыхлых отложений (ПК0).

Крылатовский профиль

Профиль располагается к западу от Крылатовского золотокварцевого месторождения, в зоне развития Серовско-Маукского разлома, разделяющего Тагильский прогиб и Восточно-Уральское поднятие. К зоне меланжа разлома приурочено силикатно-никелевое оруденение контактово-карстового типа. Данный тип оруденения локализуется в карстовых полостях верхней части карбонатной толщи. Так, в километре к северу располагается Кунгурское никель-кобальтовое месторождение, южнее известны аналогичные малые месторождения: Осиновское и Северское.

Область развития карста на Крылатовском профиле была обнаружена ранее в результате проведения аудиоманнитотеллурических зондирований (АМТЗ). Характер разрезов эффективной продольной проводимости указывал на присутствие двух хорошо проводящих объектов внутри массива известняков. Работы по детализации одного из объектов были проведены на отдельном участке профиля с помощью ВЭЗ и МСЗ. В начале детализационного профиля располагается терригенно-карбонатная толща, состоящая из мраморизованных известняков с глинистой корой выветривания (ПК0–ПК20). В интервале ПК20–ПК30 залегает полоса известняково-серпентинитового меланжа с выходящими на поверхность останцами серпентинитов и высыпками карбонатов. Далее следуют риолиты (ПК30–ПК50)

и базальты (ПК50–ПК70) субвулканического комплекса дегтярской свиты. Все геологические структуры можно различить на полученном геоэлектрическом разрезе ВЭЗ (рис. 3, а).

Особенно хорошо выделяется контакт риолитов и базальтов (ПК50) по резкой смене количества слоев и величин электрических сопротивлений. Карст, заполненный низкоомными отложениями, находится в начале профиля, однако из-за сильной раздробленности и водонасыщенности пород в зоне меланжа нельзя точно проследить его границы на геоэлектрическом разрезе. С этой задачей успешно справляются микросейсмические зондирования: на разрезе спектрального усиления хорошо выделяется контур карстовой воронки (ПК0–ПК18) повышенными величинами $J_n = 3–8$ (рис. 3, б). С востока карст ограничен тектоническим нарушением (ПК18), характеризующимся максимальными значениями $J_n \geq 10$. Еще одна аномальная зона высоких значений микросейсмического фона в верхней части разреза располагается на окончании профиля (ПК55–ПК69). Здесь залегают базальты, а наблюдаемая аномалия может быть связана с резонансными свойствами перекрывающих их рыхлых грунтов.

Выводы

Вертикальные электрические зондирования позволяют выделять карст по высокой контрастности сопротивлений вмещающих коренных пород (известняков) и терригенного материала-заполнителя (глины, суглинки). Микросейсмические зондирования дают возможность оконтурить карстовые зоны по высоким значениям спектрального усиления слабо консолидированных карстовых отложений относительно низкого уровня микросейсм в коренных породах. Таким образом, на основании комплексных электрических и микросейсмических зондирований можно уверенно идентифицировать области развития карстовых процессов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горелик А. М. Электроразведка при железнодорожных изысканиях в карстовых районах. М.: ЦНИИ, 1949. 21 с.
2. Воронков О. К., Акатов Ю. Е. Сейсморазведочные исследования на карст // Геология и геофизика. 1967. № 6. С. 98–105.
3. Cueto M., Olona J., Fernández-Viejo G., Pando L., López-Fernández C. Karst-induced sinkhole detection using an integrated geophysical survey: a case study along the Riyadh Metro Line 3 (Saudi Arabia) // Near Surface Geophysics. 2018. Vol. 16. Issue 3. P. 270–281. <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2018003>
4. Bačić M., Librić L., Kačunić D. J., Kovačević M. S. The usefulness of seismic surveys for geotechnical engineering in karst: some practical examples // Geosciences. 2020. Vol. 10. No. 10. P. 1–17. <https://doi.org/10.3390/geosciences10100406>
5. Shokati R., Maleki A., Shirzaditabar F. Evaluation of Electrical Resistivity Tomography and Electromagnetic with Very Low Frequency Method in Identifying Buried Karst in Shaho Rifts (The Case of Quri Qaleh Cave) // Physical Geography Quarterly. 2021. Vol. 14. Issue 53. P. 97–117. <https://doi.org/10.1001/1.20085656.1400.14.53.5.6>
6. Kaufmann G., Romanov D., Nielbock R. Cave detection using multiple geophysical methods: Unicorn cave, Harz Mountains, Germany // Geophysics. 2011. Vol. 76. P. B71–B77. <https://doi.org/10.1190/1.3560245>
7. Liang D., Gan F., Zhang W., Jia L. The application of HVSR method in detecting sediment thickness in karst collapse area of Pearl River Delta, China // Environmental earth sciences. 2018. Vol. 77. No. 6. P. 1–9. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7439-x>
8. Шакуро С. В. Пассивная сейсмика при карстологических исследованиях в исторической части г. Казани // Инженерная и рудная геофизика 2021: материалы 17-й науч.-практ. конф. (Геленджик, 26–30 апр. 2021 г.). М.: ООО «ЕАГЕ ГЕОМОДЕЛЬ», 2021. С. 19–27. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202152026>
9. Nakamura Y. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. // Quarterly Report of Railway Technical Research Institute. 1989. Vol. 30. No. 1. P. 25–33.
10. Bath M. Spectral analysis in geophysics. Amsterdam: Elsevier Science Publishing, 1974. 579 p.
11. Горбатилов А. В., Степанова М. Ю., Камшилин А. Н. Специфика применения метода микросейсмического зондирования в инженерных задачах // Вопросы инженерной сейсмологии. 2008. Т. 35. № 2. С. 25–30.
12. Калинина А. В., Аммосов С. М., Волков В. А. Сейсмический шум: опыт применения в инженерно-геофизических исследованиях // Разведка и охрана недр. 2008. № 1. С. 32–34.
13. Давыдов В. А. Спектральный анализ данных микросейсмических зондирований // Геофизика. 2015. № 1. С. 72–77.
14. Давыдов В. А. Малоглубинное сейсмическое зондирование на основе изучения эллиптичности микросейсм // Георесурсы. 2019. Т. 21. № 1. С. 78–85. <https://doi.org/10.18599/grs.2019.1.78-85>
15. Heisey J. S., Stokoe K. H., Hudson W. R., Meyer A. H. Determination of in situ shear wave velocities from Spectral Analysis of Surface Waves / Research Report 256-2, Center for Transportation Research. Austin: The University of Texas at Austin, 1982. 277 p.
16. Louie J. N. Faster, better: shear-wave velocity to 100 meters depth from refraction microtremor arrays // Bulletin of the Seismological Society of America. 2001. Vol. 91. No. 2. P. 347–364. <https://doi.org/10.1785/0120000098>
17. Park C. B., Miller R. D., Xia J. Multichannel analysis of surface waves // Geophysics. 1999. Vol. 64. No. 3. P. 800–808. <https://doi.org/10.1190/1.1444590>
18. Инструкция по электроразведке. Л.: Недра, 1984. 352 с.

Статья поступила в редакцию 05 ноября 2022 года

Karst detection by geophysical methods using microseismic sounding

Vadim Anatol'evich DAVYDOV*

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

Abstract

Research aim is to test a technique for detecting buried karst using microseismic sounding based on spectral amplification of horizontal displacements. The main research tasks include the construction and analysis of geoelectric and microseismic sections.

Methodology. The microseismic background was recorded using the OMAR-2s autonomous seismic station (Institute of Geophysics Ural Branch RAS, Ekaterinburg) in the frequency band 1–1000 Hz. Low-frequency horizontal seismic receivers from OYO Geospace Corporation were used as sensors. Vertical electrical sounding (VES) was carried out by a set of ERA-MAX equipment (SPC “ERA”, St. Petersburg) using a symmetrical Schlumberger installation at a frequency of 4.88 Hz, at currents of 5–50 mA. VES processing consisted in quantitative one-dimensional inversion according to the IPI2Win program (Moscow State University, Moscow).

Results. Experimental and methodological work on the study of microseisms, accompanied by VES, was carried out on two karst sites of the Sverdlovsk region. Based on the results of processing, geoelectric and microseismic sections were constructed to determine the conditions of occurrence of bedrock and loose sediments covering them, as well as to identify local anomalies associated with karst manifestations. The results of electrical exploration and seismometry are in good agreement with each other and are confirmed by geological data.

Conclusions. Vertical electrical sounding makes it possible to distinguish karst by the high contrast of the resistances of the host bedrock (limestone) and terrigenous filler material (clay, loam). Microseismic sounding makes it possible to delineate karst zones by high values of spectral amplification of weakly consolidated karst deposits, relatively low levels of microseisms in bedrock. Thus, on the basis of complex electrical and microseismic soundings, it is possible to confidently identify the areas of development of karst processes.


Keywords: microseismic background, spectral amplification, karst, tectonics, complex geophysical studies, sections of physical parameters.

REFERENCES

- Gorelik A. M. 1949, Electrical prospecting during railway surveys in karst areas. Moscow, 21 p. (*In Russ.*)
- Voronkov O. K., Akatov Yu. E. 1967, Seismic surveys on karst. *Geologiya i geofizika* [Geology and geophysics], no. 6, pp. 98–105. (*In Russ.*)
- Cueto M., Olona J., Fernández-Viejo G., Pando L., López-Fernández C. 2018, Karst-induced sinkhole detection using an integrated geophysical survey: a case study along the Riyadh Metro Line 3 (Saudi Arabia). *Near Surface Geophysics*, vol. 16, issue 3, pp. 270–281. <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2018003>
- Bačić M., Librić L., Kačunić D. J., Kovačević M. S. 2020, The usefulness of seismic surveys for geotechnical engineering in karst: some practical examples. *Geosciences*, vol. 10, no. 10, pp. 1–17. <https://doi.org/10.3390/geosciences10100406>
- Shokati R., Maleki A., Shirzaditabar F. 2021, Evaluation of Electrical Resistivity Tomography and Electromagnetic with Very Low Frequency Method in Identifying Buried Karst in Shaho Rifts (The Case of Quri Qaleh Cave). *Physical Geography Quarterly*, vol. 14, issue 53, pp. 97–117. <https://doi.org/10.1001/1.20085656.1400.14.53.5.6>
- Kaufmann G., Romanov D., Nielbock R. 2011, Cave detection using multiple geophysical methods: Unicorn cave, Harz Mountains, Germany. *Geophysics*, vol. 76, pp. B71–B77. <https://doi.org/10.1190/1.3560245>
- Liang D., Gan F., Zhang W., Jia L. 2018, The application of HVSR method in detecting sediment thickness in karst collapse area of Pearl River Delta, China. *Environmental earth sciences*, vol. 77, no. 6, pp. 1–9. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7439-x>
- Shakuro S. V. 2021, Passive seismic during karstological studies in the historical part of Kazan. Engineering and ore geophysics 2021: materials of the 17th scientific and practical conference. Moscow, pp. 19–27. (*In Russ.*) <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202152026>
- Nakamura Y. 1989, A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Quarterly Report of Railway Technical Research Institute*, vol. 30, no. 1, pp. 25–33.
- Bath M. 1974, Spectral analysis in geophysics. Amsterdam, 579 p.
- Gorbatikov A. V., Stepanova M. Yu., Kamshilin A. N. 2008, The specifics of the application of the microseismic sounding method in engineering problems. *Voprosy inzhenernoy seismologii* [Issues of engineering seismology], vol. 35, no. 2, pp. 25–30. (*In Russ.*)
- Kalinina A. V., Ammosov S. M., Volkov V. A. 2008, Seismic noise: application experience in geophysical surveys. *Razvedka i okhrana nedr* [Exploration and protection of subsoil], no. 1, pp. 32–34. (*In Russ.*)
- Davydov V. A. 2015, Spectral analysis of microseismic sounding data. *Geofizika* [Geophysics], no. 1, pp. 72–77. (*In Russ.*)
- Davydov V. A. 2019, Shallow seismic sounding based on ellipticity analysis of microtremor. *Georesursy* [Georesources], vol. 21, no. 1, pp. 78–85. (*In Russ.*) <https://doi.org/10.18599/grs.2019.1.78-85>
- Heisey J. S., Stokoe K. H., Hudson W. R., Meyer A. H. 1982, Determination of in situ shear wave velocities from Spectral Analysis of Surface Waves. Research Report 256-2, Center for Transportation Research. Austin, 277 p.
- Louie J. N. 2001, Faster, better: shear-wave velocity to 100 meters depth from refraction microtremor arrays. *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 91, no. 2, pp. 347–364. <https://doi.org/10.1785/0120000098>
- Park C. B., Miller R. D., Xia J. 1999, Multichannel analysis of surface waves. *Geophysics*, vol. 64, no. 3, pp. 800–808. <https://doi.org/10.1190/1.1444590>
- Instructions for electrical exploration. Leningrad, 1984, 352 p.

The article was received on November 05, 2022

✉ davyde@yandex.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-2483-2154>

Комплексный подход к решению горно-экологических задач на основе анализа внутренних и внешних факторов и оценки рисков

Александр Владимирович ХОХРЯКОВ*

Геннадий Андреевич СТУДЕНОК**

Сергей Георгиевич ФРОЛОВ***

Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия

Аннотация

Введение. ESG (Environmental, Social and Corporate Governance) – экологическое, социальное и корпоративное управление. Это совокупность характеристик управления компанией, при котором достигается вовлечение данной компании в решение экологических, социальных и управленческих проблем. ESG-критерии появились как ответ на ухудшение состояния окружающей среды, глобальное потепление, возрастающее экономическое неравенство между богатыми и бедными странами, что создало дополнительную почву для появления и развития новых критериев оценки инвестиций. Современное общество стало предъявлять дополнительные требования к деятельности компаний и, помимо финансовой отчетности, оценивать их с точки зрения инвестирования в устойчивое развитие.

Методология. Представляется, что ESG-подход может являться составной частью общего подхода к описанию и оценке функционирования природно-технической системы, основанной на эксплуатации недр. В статье показана возможность представления горного предприятия в виде природно-технической ESG-системы для решения горно-экологических задач.

Результаты и их анализ. В качестве примера рассмотрена система горного производства, состоящая из трех подсистем, представленных в виде пересекающихся множеств: «горные работы, являющиеся источником азотного загрязнения дренажных вод»–«природно-технический комплекс по очистке загрязненных вод»–«организация сброса очищенных вод». Такое представление системы полностью укладывается в обобщенную схему социально-центричного подхода к ESG-оценке привлекательности инвестиций, а в области пересечения множеств лежит оптимальное решение задачи достижения допустимых значений концентраций соединений азота при сбросе очищенных вод в водный объект. Данная задача может быть решена путем принятия соответствующих технологических, управленческих и инвестиционных решений.

Выводы. Принятие таких решений применительно к рассмотренной системе требует периодической оценки внешней и внутренней ситуации и сложившихся в системе взаимосвязей. Для такой оценки могут эффективно использоваться методологии SWOT и PESTEL при их переориентации с оценки только экономических факторов на совокупность факторов экологических, эколого-экономических и технологических.

Ключевые слова: ESG-подход, горно-экологические задачи, очистка вод, SWOT-анализ, PESTEL-анализ.


Введение

1 декабря 2021 г. в ходе конференции, организованной группой «Сбер», руководители 28 крупнейших российских компаний объявили о создании в РФ Национального ESG-альянса [1]. Миссия альянса – «содействие переходу к устойчивой модели развития экономики, обеспечивающей сохранение природы, благополучие общества и долгосрочное процветание бизнеса в рамках существующих ограничений природных ресурсов». Участниками альянса планируются разработка и продвижение новых норм и стандартов в области ESG, инвестиционная поддержка прорывных проектов, ориентированных на ESG-трансформацию [1].

Понятие ESG – Environmental (окружающая среда), Social (социальная сфера) и Governance (корпоративное управление) [2] охватывает и объединяет в одно целое несколько до недавнего времени отдельно рассматривавшихся направлений управления инвестициями и бизнес-проектами (рис. 1).

В соответствии с результатами опроса [3], проведенного среди российских компаний, которые имеют совет директоров, зафиксировано, что 66 % компаний уже приняли меры по интеграции ESG-подхода и концепции устойчивого развития [4] в общую стратегию компании.

✉Aleksandr.Hohryakov@m.ursmu.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-9854-5468>

**Gennadiy.Studenok@m.ursmu.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-6958-5444>

***sergey.frolov@m.ursmu.ru


 <https://orcid.org/0000-0003-1112-4212>



Рисунок 1. ESG-подход как элемент перехода к модели устойчивого развития экономики
Figure 1. ESG approach as an element of the transition to a sustainable economic development model

ESG-подход представляет собой оценку бизнеса через влияние на окружающую среду, социальную сферу и взаимоотношения с акционерами (рис. 2) [3].

Оценка влияния на окружающую среду *E* подразумевает оценку эффективности деятельности бизнеса через влияние на окружающую среду, применение наилучших доступных технологий, а также оценку качества экологического менеджмента.

Можно выделить основные направления оценки:

- влияние на атмосферу;
- влияние на водную среду;
- влияние на землю;
- отходы и упаковка;
- энергоэффективность;
- система экологического менеджмента.

Оценка деятельности бизнеса в социальной сфере *S* подразумевает определение уровня заботы о сотрудниках, соблюдения их прав, внедрения современных подходов в области социальной ответственности. Основными направлениями оценки можно назвать:

- корпоративную социальную ответственность;
- оплату труда сотрудников;
- социальную защищенность и профессиональное развитие сотрудников;
- охрану труда и производственную безопасность;
- взаимодействие с местным населением.

Оценка качества корпоративного управления *G* предполагает оценку бизнеса как системы взаимодействия между собственниками, менеджментом и прочими стейкхолдерами [3]. Уровень корпоративного управления оказывает влияние на стоимость акций компании [6].

Стоит отметить растущее влияние ESG-подхода в мире на перераспределение приоритетов при выборе направлений инвестиций и оценки их эффективности



Рисунок 2. ESG-интеграция как характеристика соответствия принципам концепции устойчивого развития [5]
Figure 2. ESG integration as a characteristic of compliance with the principles of the concept of sustainable development [5]

(рис. 3). На первый план постепенно выходит определение долгосрочных приоритетов, включение вопросов ESG в концепцию развития бизнеса или организации, отражение этих вопросов в видении миссии организации и, наконец, их реализацию на нескольких уровнях [7].

В свете сказанного в мире наблюдается устойчивый рост так называемого «зеленого» финансирования (рис. 4) [9].

Как видно из приведенного, тренд на усиление влияния фактора ESG при выборе альтернатив инвестирования и при оценке эффективности инвестиций достаточно очевиден. При этом очевидна и необходимость по-новому оценивать и объекты инвестирования, учитывая фактор вовлечения природных ресурсов и рассматривая такие объекты как сложные динамические природно-технические системы.

Применительно к проектам в минерально-сырьевом комплексе необходимо учитывать еще и высокую инерционность таких систем.

Если в общем случае социально-центричный системный ESG-подход можно отобразить схемой, приведенной на рис. 5, то в случае минерально-сырьевого комплекса необходимо учитывать еще и специфику широкого спектра горно-экологических задач, которая обусловлена, прежде всего, тесной связью принимаемых решений со спецификой недр на участке, где ведется добыча полезных ископаемых, географическим расположением этого участка, особенностями технологии добычи и обогащения извлекаемого из недр сырья.

Методология

Горное производство является типичной природно-технической системой, т. е., согласно [11], совокупностью природных, природно-техногенных и техногенных объектов, условия существования которых взаимозависимы и взаимообусловлены. Спецификой природно-технических систем горного производства является постоянное взаимодействие с окружающей средой совокупности технологических объектов и процессов, направленных на извлечение полезного ископаемого из недр и его обогащение. Общеизвестным является то, что горное про-



Рисунок 3. Использование ESG-рейтинга на различных этапах инвестиционных расчетов [8]
Figure 3. Using the ESG rating at various stages of investment calculations [8]

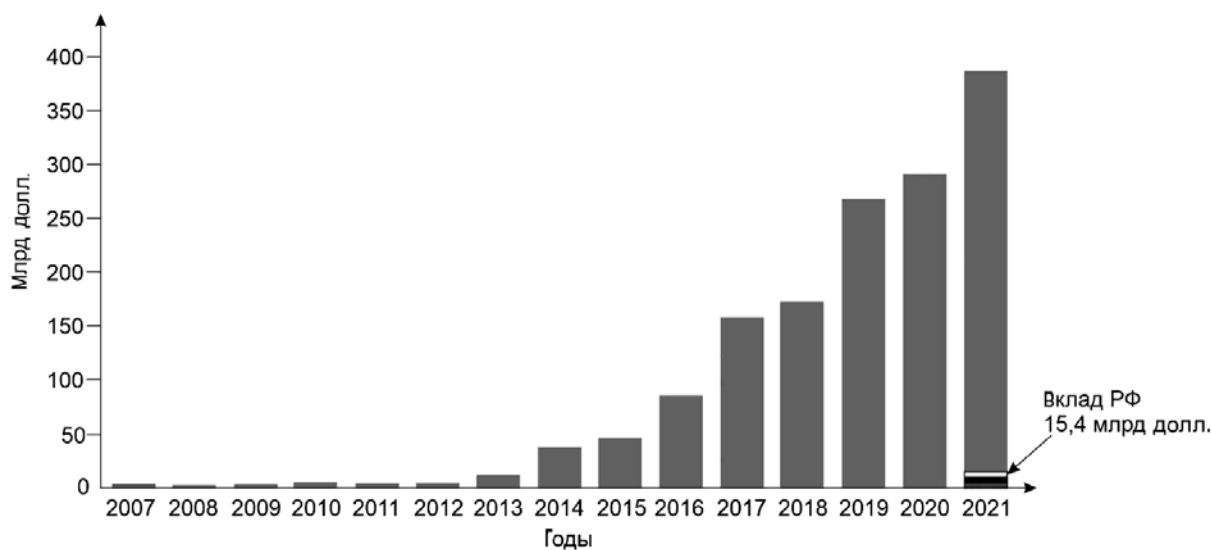


Рисунок 4. Динамика «зеленого» финансирования в мире (совокупный объем эмиссии «зеленых» облигаций), млрд долл./год
Figure 4. Dynamics of “green” financing in the world (total volume of “green” bonds issuance), billion USD/year

изводство является и мощным фактором негативного воздействия на окружающую среду, влияющим в той или иной степени на все ее компоненты – атмосферный воздух, поверхностные и подземные воды, почву, недра, растительный и животный мир. Согласно действующему природо-охранному законодательству, негативное воздействие на окружающую среду ограничивается установленными нормативами допустимого воздействия, в связи с чем одной из первоочередных горно-экологических задач горных предприятий является соблюдение данных нормативов, обеспечивающих допустимое воздействие на окружающую среду и, соответственно, приемлемое качество окружающей среды в районе расположения горного предприятия. Качественные характеристики окружающей среды в зоне влияния предприятия есть не что иное, как результат функционирования всей сложной природно-технической системы горного производства. Таким образом, эффективность управления качественными характеристиками окружающей среды есть, не в последнюю очередь, производная от эффективности управления всей природно-технической системой горного производства, которая состоит из набора подсистем (добычи, обогащения, размещения отходов, обеспечения производства и других), состоящих, в свою очередь, из множеств разнообразных элементов с разными, меняющимися во времени параметрами. Исходя из сказанного, авторы считают перспективным при решении горно-экологических задач применение принципов системного подхода, обеспечивающего совокупный учет влияния технологических элементов

горного производства и сопутствующих ему природных элементов (т. е. всех элементов природно-технической системы) на качественные характеристики компонентов окружающей среды. При этом ESG-подход представляется необходимой составной частью общего подхода к описанию и оценке функционирования природно-технической системы, основанной на эксплуатации недр.

Результаты и их анализ

Таким образом, применение системного подхода (который одновременно будет основываться и на ESG-принципах) для решения комплексных горных и горно-экологических задач предполагает представление горного предприятия в виде природно-технической ESG-системы, для чего необходимо выявление и обоснование принадлежности к системе взаимодействующих между собой подсистем и элементов, составляющих конкретное горное производство (природно-техническую систему) и описание их взаимодействия. Чем большее количество подсистем и их элементов будет выявлено и чем точнее будут отображены их взаимосвязи, тем эффективнее при прочих равных условиях будет использование такого подхода для управления качеством окружающей среды.

Как один из примеров природно-технической системы рассмотрим горное предприятие, которое ведет открытую разработку месторождения с применением буровзрывных работ. Использование ВВ на основе аммиачной селитры (порэмит) приводит к попаданию в дренажные воды соединений азота – аммонийного, нитрит-

ного и нитратного азота. На предприятии применяется внутреннее отвалообразование, при котором значительное количество горной массы (вскрышные и вмещающие породы), загрязненной соединениями азота, остается в дренируемой области и, следовательно, является источником загрязнения дренажных вод соединениями азота. Дренажные воды направляются на естественную биологическую очистку в отработанную горную выработку, где в ходе процессов естественной микробиологической нитрификации происходит снижение содержания наиболее токсичных форм азота (аммонийной и нитритной) в дренажных водах за счет их преобразования в менее токсичную нитратную форму и разбавления атмосферными осадками и подземными водами. После прохождения данных процессов очищенные дренажные воды сбрасываются в водный объект по системе самотечных водоводов.

В описанной природно-технической системе можно выделить три подсистемы, тем или иным образом определяющие качество сбрасываемых дренажных вод, – подсистема горных работ, являющаяся источником азотного загрязнения дренажных вод, подсистема природно-технического комплекса по очистке дренажных вод и подсистема сброса очищенных вод. Каждая из подсистем представлена отдельным множеством характеризующих ее элементов – множества A , B и C соответственно.

Задачей в рассматриваемом случае является нахождение путем анализа и управления параметрами рассматриваемых подсистем, оптимальной комбинации технических и организационных решений, позволяющих в конкретных природных условиях достигнуть величины допустимого сброса.

К множеству A в нашем случае относятся такие элементы, характеризующие природные, технические и технологические условия извлечения горной массы, как характеристики разрабатываемого обводненного месторождения, характеристики применяемого взрывчатого вещества на основе аммиачной селитры и объема его использования, параметры внутренних отвалов, исходная концентрация загрязняющих веществ в карьерном водоотливе, объем карьерного водоотлива и т. п.

В множество B входят величины, характеризующие условия проведения процесса очистки, такие как параметры отработанной затопленной горной выработки, в которой происходит очистка дренажных вод; качественные и количественные характеристики нитрифицирующих микроорганизмов, с помощью которых и происходит очистка воды от загрязнения; исходная концентрация загрязняющих веществ в карьерном водоотливе, концентрация загрязняющих веществ в очищенных водах, объем отводимых очищенных дренажных вод и т. д.

Наконец, элементы множества C характеризуют условия отведения очищенных дренажных вод и их сброса в природный водный объект. К ним относятся: параметры инфраструктуры водоотведения, характеристики водного объекта (водоприемника) – глубина и ширина русла, скорость течения воды и расход воды в реке, концентрация загрязняющих веществ в очищенных водах и т. д., величина платежей за сброс очищенных дренажных вод.

Совокупность элементов каждого из рассматриваемых множеств находится в динамике и взаимодействует



Рисунок 5. HPSM – перспективный сегмент рынка, определяемый соответствием принципам концепции устойчивого развития [10]

Figure 5. HPSM is a promising market segment, determined by compliance with the principles of the concept of sustainable development [10]

через элементы, принадлежащие к области пересечения множеств. Таким образом, взаимодействие подсистем в рамках общего множества осуществляется через элементы, находящиеся в области пересечения составляющих его множеств.

Элементы множеств A , B и C в совокупности составляют множество $Z = (A \cup B \cup C)$. В этом случае множества A , B и C выступают как подмножества, образующие множество Z .

Таким образом, $\forall x \in Z \rightarrow (x \in A) \vee (x \in B) \vee (x \in C)$, т. е., другими словами, для каждого элемента x , принадлежащего множеству Z , следует что он одновременно относится к одному из подмножеств – A , B или C .

Изменение элементов, принадлежащих к области пересечения, в ответ на какое-либо внешнее или внутреннее возмущение ведет к качественному и (или) количественному изменению каждого из множеств A , B , C или, в соответствии с принятой в [12] системой обозначений:

$$\forall x \{ (x \in A) \wedge (x \in B) \wedge (x \in C) \mid \beta_{ABC} \},$$

где β_{ABC} – свойство, означающее, что при изменении любого элемента x , принадлежащего к области пересечения, изменяются характеристики множеств A , B и C .

Иными словами, при изменении качественных и количественных характеристик элементов из области пересечения происходит изменение общих функциональных характеристик множеств A , B и C . Например, при изменении объема водоотлива (элемент множества A) меняется объем очищаемых вод (элемент множества B) и, в свою очередь, изменяется объем отводимых очищенных вод (элемент множества C). Таким образом, изменение параметров водоотлива меняет множества A , B и C , так как параметры водоотлива входят в область пересечения данных множеств.

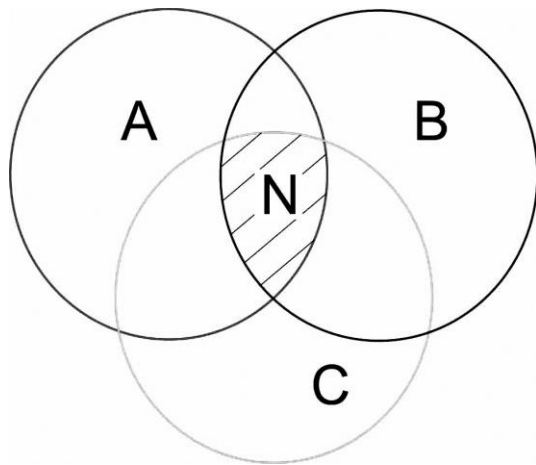


Рисунок 6. Пересечение множеств *A*, *B* и *C* как область нахождения оптимального решения задачи достижения величины допустимого сброса

Figure 6. Intersection of sets *A*, *B* and *C* as an area for finding the optimal solution to the problem of achieving the value of the allowable reset

Обозначим область пересечения множеств *A*, *B* и *C* как *N* (рис. 6).

Заштрихованная на рис. 6 область *N* пересечения множеств *A*, *B* и *C* применительно к описанной системе «горные работы, являющиеся источником азотного загрязнения дренажных вод»–«технологический комплекс по очистке»–«организация сброса очищенных вод» представляет собой совокупность природных и технологических параметров, обеспечивающих оптимальное функционирование системы. Иными словами, в этой наиболее «чувствительной» области, характеризующей как всю систему в целом, так и каждую из слагающих ее подсистем, находится оптимальное решение поставленной задачи – достижения величины допустимого сброса при отведении очищенных вод в водный объект – путем управления параметрами (характеристиками) элементов из области пересечения.

Важным является также тот факт, что при изменении качественных и количественных характеристик элементов из области пересечения изменение параметров множеств *A*, *B* и *C* в целом происходит не одновременно, а с задержкой на время $T_{откл}$ формирования отклика системы на воздействие, что является типичным для сложных динамических систем, к которым относятся природно-технические системы горного производства [13]. Эффективность функционирования системы при прочих равных условиях в рассматриваемом случае оценивается величиной *C* концентрации загрязняющих веществ в сбрасываемых водах в точке сброса и соблюдением условия ее неперевышения над допустимым значением $C_{ндс}$. Таким образом, $C \leq C_{ндс}$; $C = F(T_{откл}, q_{jxi})$, $j = 1 \dots m_{xi}$, $i = 1 \dots n$, где $T_{откл}$ – время формирования отклика системы на управляющее воздействие; q_{jxi} – *j*-й параметр элемента x_i , принадлежащего к области пересечения *N*; m_{xi} – количество параметров q_{jxi} каждого из элементов x_i , составляющих область пересечения *N*; n – количество элементов x_i , составляющих область пересечения *N*.

Значение времени отклика является важным с точки зрения принятия управленческих решений и, как следствие, повышения эколого-экономической эффективно-

сти производства, так как определяет скорость, с которой система реагирует на внешнее возмущение. В общем случае можно утверждать, что чем меньше время отклика системы в ответ на внешнее возмущение, тем более стабильной является ее работа [13].

Как видно из рис. 6, подход, примененный к рассмотренному достаточно частному случаю, полностью укладывается в обобщенную схему социально-центричного подхода [14] к ESG-оценке привлекательности инвестиций, а область *N* на рис. 6 представляет собой множество элементов, определяющих границы области HPSM на рис. 5.

Как уже говорилось, любая природно-техническая система по природе своей – система динамическая. Таким образом, принятие как управленческих решений, так и решений в области инвестиций применительно к такой системе требует периодической переоценки внешней и внутренней ситуации [15] и сложившихся в системе взаимосвязей.

Представляется, что применение ESG-подхода для условий природно-технической системы, в основе которой лежит недропользование, будет наиболее эффективным с использованием методологий SWOT и PESTEL.

Применяемый для анализа среды метод SWOT (аббревиатура составлена из первых букв английских слов) – это метод стратегического планирования, заключающийся в выявлении факторов внутренней и внешней среды организации и разделении их на четыре категории: Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы). SWOT-анализ позволяет провести совместное изучение внешней и внутренней среды [16], в нашем случае – применительно к природно-технической системе. Применяя метод SWOT, можно установить связи между сильными и слабыми сторонами структуры природно-технической системы и внешними угрозами и возможностями. Выявленные цепочки связей в дальнейшем могут быть использованы для формулирования стратегии организации, обоснования принятия решений [16–19].

Экологическая составляющая привносит свою специфику в выполнение SWOT-анализа [20], особенно для условий минерально-сырьевого комплекса. При анализе сильных сторон предприятия, рассматриваемого как природно-техническая система, учитывается наличие экологически безопасных (экологически благоприятных) технологических процессов и экологических характеристик выпускаемой продукции, наличие «зеленого» имиджа предприятия, подготовленности и готовности персонала к соблюдению экологических норм, регламентов и стандартов, наличие потенциала для внедрения наилучших доступных технологий, безопасных для человека и окружающей среды.

Анализ слабых сторон не в последнюю очередь должен учитывать наличие экологически опасных технологий, потенциальную возможность выбросов и сбросов ранее установленных пределов, образование опасных отходов и другие факторы, которые могут потенциально служить формированию имиджа экологически опасного предприятия.

Анализ возможностей в этом случае предполагает учет потенциала овладения новыми рынками либо расширения пространства уже имеющихся за счет продвижения экологически безопасных продуктов и использо-

вания экологически приемлемых технологий при выпуске продукции, потенциала долговременного выживания компании за счет формирования «зеленого» имиджа, возможностей обеспечения необходимой результативности природоохранных мер.

Анализ угроз и рисков должен учитывать вероятность усиления государственного вмешательства и контроля за соблюдением экологического законодательства, возможную необходимость дополнительных инвестиций вследствие ужесточения экологических требований, потенциальную возможность бойкота/запрета продукции на тех или иных рынках по экологическим причинам.

Если SWOT-анализ изучает положение компании на рынке, включая экологические аспекты, и заключается в разделении факторов и явлений на четыре категории: Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы), то анализ PESTEL – это маркетинговый инструмент, предназначенный для изучения именно внешней среды компании с целью идентифицировать и оценить исходящие отсюда возможности и угрозы для нее, в том числе экологически обусловленные возможности

и угрозы. PESTEL предназначен для выявления политических (Political), экономических (Economic), социокультурных (Social), технологических (Technological), экологических (Environmental), и законодательных, правовых (Legal) аспектов внешней среды, которые влияют или могут повлиять на деятельность компании. Анализ выполняется по схеме «фактор внешней среды–предприятие». Результаты, как и в случае SWOT-анализа, оформляются в виде матрицы [21–26].

Выводы

Как видно из приведенного, есть все основания полагать, что именно комбинированное использование обоих видов анализа может дать наибольший эффект при выполнении ESG-оценки компаний и привлекательности инвестиций, особенно при выполнении таких оценок применительно к сложным природно-техническим комплексам, в основе которых лежат процессы недропользования. И конечно, дальнейшее продвижение в жизнь применения ESG-оценок потребует подготовки для минерально-сырьевого комплекса страны специалистов-экологов нового уровня [27].

ЛИТЕРАТУРА

1. В России создан Национальный ESG-альянс // Ведомости. Экология: 2021. URL: <https://www.vedomosti.ru/ecology/esg/news/2021/12/01/898565-v-rossii-sozdan-natsionalnii-esg-alyans>
2. The Institutional Investor's Guide to ESG Investing // Pensions & Investments. 2021. URL: <https://www.pionline.com/ESGguide2021>
3. ESG: хайп или устойчивое развитие и прибыльность бизнеса в будущем / Executive.ru. 2021. URL: <https://www.e-xecutive.ru/management/practices/1993860-esg-v-rossii-realnost-ili-perspektiva>
4. Шакиров А. Д. О концепции устойчивого развития и ее принципах // Ученые записки Казанского университета. 2011. Т. 153. № 1. С. 217–225.
5. Environmental, Social and Corporate Governance / Mobeus. 2022. URL: <https://www.mobeus.co.uk/esg>
6. Каков уровень корпоративного управления в вашей компании? / Executive.ru. 2011. URL: <https://www.e-xecutive.ru/finance/business/1568076-kakov-uroven-korporativnogo-upravleniya-v-vashei-kompanii>
7. ESG transformation: A new-age movement / The Economic Times. 2021. URL: <https://economictimes.indiatimes.com/news/company/corporate-trends/esg-transformation-a-new-age-movement/articleshow/87642065.cms>
8. Integration of ESG evaluation / Nissay Asset Management. 2022. URL: <https://www.nam.co.jp/english/responsibleinvestor/esg/mainstreaming.html>
9. Место России на рынке «зеленого» финансирования / Росконгресс. 2021. URL: <https://roscongress.org/materials/mesto-rossii-na-rynke-zelenogo-finansirovaniya/>
10. ESGforum.com. 2022. URL: <http://esgforum.com/>
11. Суздалева А. Л. Системная техноэкология и управляемые природно-технические системы // Безопасность в техносфере. 2016. Т. 5. № 3. С. 6–14. <https://doi.org/10.12737/21718>
12. Бурбаки Н. Теория множеств / пер. с франц. Г. Н. Поварова, Ю. А. Шихановича; под ред. В. А. Успенского. Изд. 2-е. М.: Либроком, 2010. 456 с.
13. Хохряков А. В., Ларионова И. В., Москвина О. А., Цейтлин Е. М. Системный подход к обеспечению экологической безопасности в горной промышленности // ГИАБ. 2020. № 3-1. С. 501–517. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-31-0-501-517>
14. Semin A. N., Potekhin N. A., Potekhin V. N. Formation of the rational socio-economic worldview based on the laws of nature and society // International Journal of Criminology and Sociology. 2020. № 9. P. 1144–1153. <https://doi.org/10.6000/1929-4409.2020.09.135>
15. Guman O., Wegner-Kozlova E. Impact of the regional development specifics on the system of circular economy assessment // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 208. P. 1–9. Article number 01004. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020801004>
16. Метод SWOT-анализа // Журнал «У». Экономика. Управление. Финансы/ 2022. URL: <https://port-u.ru/voprosy-strateg/metod-swot-analiza>
17. How to do a SWOT Analysis for Better Strategic Planning / BPlans. 2022. URL: <https://articles.bplans.com/how-to-perform-swot-analysis/>
18. SWOT analysis: the weak and strong sides of the enterprise in excel example / ExelTABLE.com. 2022. URL: <https://exceltable.com/en/analyses-reports/swot-analysis-example>
19. Методика SWOT-анализа в стратегическом менеджменте. Эффективный инструмент планирования / By The Way. Creative Online. 2019. URL: <https://btw.by/pro-obzor/35267-metodika-swot-analiza-v-strategicheskome-menedzhmente-effektivnyj-instrument-planirovaniya.html>
20. Экономический механизм осуществления экологической политики / Эколог. Экология и экологическая безопасность. 2022. URL: https://ekolog.org/books/9/15_3.htm
21. Что такое анализ PESTEL и когда он применяется? / vs.ru – бизнес, технологии, идеи, модели роста, стартапы. 2020. URL: <https://vs.ru/389356-biplane24/108707-cto-takoe-analiz-pestel-i-kogda-on-primenyaetsya>
22. Что такое ситуационный анализ и как его используют в маркетинге / Контур. Журнал. 2020. URL: <https://kontur.ru/articles/5905>
23. PESTEL analysis / CIPD. 2021. URL: <https://www.cipd.co.uk/knowledge/strategy/organisational-development/pestle-analysis-factsheet#8000>
24. What is a PESTEL analysis? / Oxford college of marketing. 2022. URL: <https://blog.oxfordcollegeofmarketing.com/2016/06/30/pestle-analysis/>
25. Scanning the Environment: PESTEL Analysis / B2U. Business-to-you. 2016. URL: <https://www.business-to-you.com/scanning-the-environment-pestel-analysis/>
26. PESTEL analysis. Political, Economic, Social, Technological, Environmental, and Legal factors / CFI. 2022. URL: <https://corporatefinanceinstitute.com/resources/knowledge/strategy/pestel-analysis/>
27. Хохряков А. В., Цейтлин Е. М., Студенок Г. А. Подготовка специалистов-экологов нового поколения как важный элемент формирования конкурентных преимуществ отечественной минерально-сырьевой отрасли перед лицом глобальных вызовов настоящего и будущего // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2022. № 1. С. 112–126. <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2022-1-112-126>

Статья поступила в редакцию 27 января 2023 года

Integrated approach to solving the mining-environmental issues based on the analysis of internal and external factors

Aleksandr Vladimirovich KHOKHRYAKOV*

Gennadiy Andreevich STUDENOK**

Sergey Georgievich FROLOV***

Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia

Abstract

Introduction. ESG – Environmental, Social and Corporate Governance is a set of characteristics of company management, in which the involvement of this company in solving environmental, social and management problems is achieved. ESG criteria appeared as a response to environmental degradation, global warming and increasing economic inequality between rich and poor countries, which created additional ground for the emergence and development of new investment evaluation criteria. Modern society has begun to impose additional requirements not only to the business activities of companies and their financial statements, but started to evaluate it in terms of investments in sustainable development.

Methodology. It seems that the ESG-approach could be an integral part of the general approach to the description and evaluation of the functioning of a nature-technology system which is based on the mining of mineral resources. The article shows the possibility of depiction of a mining enterprise as a nature-technology ESG-system for solving combined mining and environmental issues.

Results and their analysis. As an example a mining system is described consisting of three subsystems, presented in the form of intersecting sets: “mining operations that are a source of nitrogen pollution of drainage waters” – “natural-technical complex for the purification of polluted waters” – “organization of the discharge of purified waters”. Such a representation of the said system fits into the generalized scheme of the socially-centric approach to ESG-assessment of investments. The area of intersection of the sets is the area where the optimal solution of the problem lies in terms of achieving an acceptable concentrations of nitrogen compounds when the purified water is discharged to the water body. The said problem could be solved by an appropriate combination of the technological, management and investment decisions.

Conclusions. Making such kind of decisions in relation to a nature-technology system requires a periodic assessment of the system external and internal environment as well as in-system interconnections. For such type of assessments SWOT and PESTEL methodologies can be effectively applied being spread from economic factors assessments only to a wide range of environmental, technological and environmentally related economic factors.

Keywords: ESG-approach, mining and environmental problems, water purification, SWOT-analysis, PESTEL-analysis.

REFERENCES

1. The National ESG Alliance has been created in Russia. Vedomosti. Ecology: 2021. (*In Russ.*) URL: <https://www.vedomosti.ru/ecology/esg/news/2021/12/01/898565-v-rossii-sozdan-natsionalnii-esg-alyans>
2. The Institutional Investor's Guide to ESG Investing. Pensions & Investments. 2021. URL: <https://www.pionline.com/ESGguide2021>
3. ESG: hype or sustainable development and business profitability in the future. Executive.ru. 2021. (*In Russ.*) URL: <https://www.e-xecutive.ru/management/practices/1993860-esg-v-rossii-realnost-ili-perspektiva>
4. Shakirov A. D. 2011, On the concept of sustainable development and its principles. *Uchenyye zapiski Kazanskogo universiteta* [Scientific notes of Kazan University], vol. 153, no. 1, pp. 217–225. (*In Russ.*)
5. Environmental, Social and Corporate Governance. Mobeus. 2022. URL: <https://www.mobeus.co.uk/esg>
6. What is the level of corporate governance in your company? Executive.ru. 2011. URL: <https://www.e-xecutive.ru/finance/business/1568076-kakov-uroven-korporativnogo-upravleniya-v-vashei-kompanii>
7. ESG transformation: A new-age movement. The Economic Times. 2021. URL: <https://economictimes.indiatimes.com/news/company/corporate-trends/esg-transformation-a-new-age-movement/articleshow/87642065.cms>
8. Integration of ESG evaluation. Nissay Asset Management. 2022. URL: <https://www.nam.co.jp/english/responsibleinvestor/esg/mainstreaming.html>
9. Russia's place in the green finance market. Roscongress. 2021. (*In Russ.*) URL: <https://roscongress.org/materials/mesto-rossii-na-rynke-zelenogo-finansirovaniya/>
10. ESGforum.com. 2022. URL: <http://esgforum.com/>


✉ Aleksandr.Hohryakov@m.ursmu.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-9854-5468>

**Gennadiy.Studenok@m.ursmu.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-6958-5444>

***sergey.frolov@m.ursmu.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-1112-4212>

11. Suzdaleva A. L. 2016, System technoecology and controlled natural and technical systems. *Bezopasnost' v tekhnosfere* [Security in the technosphere], vol. 5, no. 3, pp. 6–14. (In Russ.) <https://doi.org/10.12737/21718>
12. Bourbaki N. 2010, Set Theory. Moscow, 2010. 456 p. (In Russ.)
13. Khokhryakov A. V., Larionova I. V., Moskvina O. A., Zeitlin E. M. 2020, A system approach to environmental safety management in mining. *GIAB* [Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)], no. 3-1, pp. 501–517. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-31-0-501-517>
14. Semin A. N., Potekhin N. A., Potekhin V. N. 2020, Formation of the rational socio-economic worldview based on the laws of nature and society. *International Journal of Criminology and Sociology*, no. 9, pp. 1144–1153. <https://doi.org/10.6000/1929-4409.2020.09.135>
15. Guman O., Wegner-Kozlova E. 2020, Impact of the regional development specifics on the system of circular economy assessment. *E3S Web of Conferences*, vol. 208, pp. 1–9, Article number 01004. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020801004>
16. SWOT analysis method. Y magazine. Economy. Control. Finance, 2022. (In Russ.) URL: <https://port-u.ru/voprosy-strateg/metod-swot-analiza>
17. How to do a SWOT Analysis for Better Strategic Planning. BPlans, 2022. URL: <https://articles.bplans.com/how-to-perform-swot-analysis/>
18. SWOT analysis: the weak and strong sides of the enterprise in excel example. ExelTABLE.com, 2022. URL: <https://exceltable.com/en/analyses-reports/swot-analysis-example>
19. Methodology of SWOT-analysis in strategic management. An effective planning tool. By The Way. Creative Online, 2019. (In Russ.) URL: <https://btw.by/pro-obzor/35267-metodika-swot-analiza-v-strategicheskome-menedzhmente-effektivnyj-instrument-planirovaniya.html>
20. Economic mechanism for the implementation of environmental policy. Ecologist. Ecology and environmental safety, 2022. (In Russ.) URL: https://ekolog.org/books/9/15_3.htm
21. What is PESTEL analysis and when is it applied? / VC.ru – business, technology, ideas, growth models, startups. 2020. (In Russ.) URL: <https://vc.ru/u/389356-biplane24/108707-cto-takoe-analiz-pestel-i-kogda-on-primenyaetsya>
22. What is situational analysis and how it is used in marketing. Contour. Magazine, 2020. (In Russ.) URL: <https://kontur.ru/articles/5905>
23. PESTEL analysis. CIPD, 2021. URL: <https://www.cipd.co.uk/knowledge/strategy/organisational-development/pestle-analysis-factsheet#8000>
24. What is a PESTEL analysis? Oxford college of marketing, 2022. URL: <https://blog.oxfordcollegeofmarketing.com/2016/06/30/pestel-analysis/>
25. Scanning the Environment: PESTEL Analysis. B2U. Business-to-you, 2016. URL: <https://www.business-to-you.com/scanning-the-environment-pestel-analysis/>
26. PESTEL analysis. Political, Economic, Social, Technological, Environmental, and Legal factors. CFI, 2022. URL: <https://corporatefinanceinstitute.com/resources/knowledge/strategy/pestel-analysis/>
27. Khokhryakov A. V., Zeitlin E. M., Studenok G. A. 2022, Training of environmentalists of a new generation as an important element in the formation of competitive advantages of the domestic mineral and raw materials industry in the face of global challenges of the present and future. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Gornyy zhurnal* [Minerals and mining engineering], no. 1, pp. 112–126. (In Russ.) <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2022-1-112-126>

The article was received on January 27, 2023

Экономические науки Economic sciences

УДК 338.45:622.0046

<http://doi.org/10.21440/2307-2091-2023-1-122-130>

Methodological tools for assessing the competitiveness of enterprises of the mining complex

Aleksandr Sergeevich SOKOLOV^{1*}
Aleksy Vladimirovich DUSHIN^{1**}
Valeriy Vasil'evich BALASHENKO^{1,2***}
Oleg Valer'evich GENZEL^{1****}

¹Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia

²Institute of Economics of the Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russia

Abstract

Relevance. The mineral resource complex of Russia remains the basis for the sustainable development of the state and its competitive advantage in world trade. As before, up to 70% of the foreign exchange earnings of the Russian Federation is formed thanks to its products, including metallurgy. The mining industry is a backbone for the national economy, determining the efficiency and nature of the development of related sectors, provides a decisive contribution to the formation of the stabilization fund and the country's gold and foreign exchange reserves. The competitiveness of a country (national competitiveness) is made up of the competitiveness of regions, industries, enterprises and organizations, their ability to win and strengthen their leading positions in domestic and foreign markets. Competitiveness management requires constant evaluation of this parameter.

The purpose of the research is the development of methodological tools for assessing the competitiveness of mining enterprises, taking into account the sectoral approach.

Research methods. The work uses general scientific methods of analysis and synthesis, program-target approach, economic, logical and logical-structural analysis, methods of comparison, analogy, expert assessments.

Results. The article presents the results of the analysis of the methods used to assess competitiveness, and the rationale for the need for an industry-specific approach to the implementation of assessment procedures. A system of partial assessment factors is proposed that characterizes the competitiveness of mining enterprises, taking into account the specifics of their production activities. The expediency of referring to a comparative assessment on the Harrington desirability scale, introducing additional products into the procedure for assessing profit and profitability indicators and calculating an integral indicator is proved. The proposed methodological tools have been tested for the conditions of four gold mining enterprises.

Conclusions. The proposed methodological tools make it possible to obtain the most reliable assessments of the competitiveness of mining enterprises, taking into account the specifics of the industrial activity of the latter. Of particular note is the possibility of using the developed methodological tools for assessing the investment attractiveness of enterprises in the mining complex.

Keywords: competitiveness, mining enterprises, methodological tools, factors, integral indicator, algorithm.

Introduction

In modern economic science, much attention is paid to competition issues. The need to identify the most competitive enterprises for the state is a key condition for the distribution of subsidies, grant-in-aids, tax breaks, and for investors - the key to obtaining the desired effect. Advantages in activity for any enterprise under preferential treatment, especially for small and medium-sized enterprises, put them in a better position than other participants in economic activity. The organization, formation and development of such enterprises lead to the creation of jobs, reduce social

tension, and solve other issues of national importance. To quantify the competitiveness of enterprises and goods, there are many methods developed by foreign and domestic authors. All the most well-known methods and models for assessing competitiveness today can be divided into two groups: calculation (analytical) and matrix (graphic). At the same time, there are many classifications, where these groups are divided into a number of additional methods. For example, calculation methods are divided into specific, complex, integral, benchmarking, etc.

✉alexander-sokolov@mail.ru

**dushin.a@list.ru

***bala10@mail.ru

****ief.em@m.ursmu.ru, ief.etp@m.ursmu.ru

The analysis shows that the following methods take place in practice:

- based on the theory of comparative advantage; the approach was first proposed by D. Ricardo [1]; the modern interpretation of the method, according to the models of Heckscher–Ohlin, Samuelson–Stolper and others, – the country exports those types of goods for which its productivity is higher than that of the counterparty country, and imports goods of those industries in which productivity is lower (in relation to international competition);

- based on the assessment of the competitiveness of products; proposed by R. A. Fatkhutdinov, A. A. Voronov and others; according to this method, the higher the competitiveness of its products, the higher the competitiveness of an enterprise is; the disadvantage of the method is that the competitiveness of an enterprise is determined only by the competitiveness of products;

- based on the theory of effective competition; proposed by I. A. Maksimova, D. A. Milgrom [2] and others; according to the method, the most competitive are those enterprises where the work of all departments and services is best organized; the method involves the use of mainly expert assessments, which does not make it possible to objectively determine the level of competitiveness of an enterprise;

- competitiveness assessments based on a systematic approach involve evaluating the results of interdependent systems; the evaluation determines the significance of each criterion; requires the use of cumbersome economic and mathematical models;

- based on an assessment of the level of use value; proposed by K. R. Nurmaganbetov, N. D. Esmagulova [3] and others; the level of competitiveness is determined by the totality and relative importance (quality, price, level of sales organization) of the consumer properties of the product; do not give a full assessment of the competitiveness of the enterprise;

- based on market share calculation; proposed by L. V. Tselikova [4] and others; an increase or decrease in the share in the range from 0 to 100% indicates the level of competitiveness; disadvantage – when determining the place of an enterprise in the market, it is impossible to determine the reasons for the identified situation and, accordingly, develop the necessary strategy to increase competitiveness;

- using an ideal product (or a model with an ideal point); proposed by O. V. Kirilova, S. F. Golov (in the version with the measurement of the degree of satisfaction of the need for the product); the degree of deviation of the proposed product from the ideal is determined; disadvantage – subjectivity in determining the characteristics of an ideal product, the use of expert assessments.

Separately, we can note the dynamic method for assessing the competitiveness of enterprises (V. V. Krivorotov [5], D. S. Voronov [6]).

To assess the competitiveness of an enterprise, a product, various criteria and indicators are used. According to M. Porter [7], indicators and criteria can be divided into natural (natural resources, geographic location) and artificial (technologies used, economic environment, etc.), as well as internal (production and economic potential, marketing, personnel, etc.) and external (government influence, the socio-economic situation of the country, the nature of markets, etc.).

Depending on the choice of the method for assessing the level of competitiveness, an enterprise can determine and operate with indicators characterizing the goods produced, or determine the indicators used in the analysis of the production and economic activities of the enterprise (i.e., determine the level of competitiveness of an enterprise by the competitiveness of manufactured goods or by competitiveness production activities of the enterprise). In a number of methods, the authors propose formulas for calculating the integral indicator of the competitiveness of an enterprise or products based on partial indicators. Often, various criteria, indicators are combined into functional groups. So, R. A. Fatkhutdinov proposes the following groups of indicators for assessing the competitiveness of an organization:

- 1) advantages in the external environment (macro environment, regional infrastructure, micro environment);

- 2) advantages in the internal environment (technology, organization of processes, resources);

- 3) advantages in the quality and resource intensity of manufactured goods, innovations (goods, innovations, services);

- 4) market advantages (in terms of market size, number of competitors, efficiency and reliability of financial transactions, trade security).

In the work of L. V. Tselikova, the indicators are combined into 8 groups [4], etc.

Currently, among specialists there is no single point of view on the composition of indicators characterizing the level of competitiveness of an enterprise, which is noted in a number of studies [5, 8]. Often, when assessing competitiveness, a set of indicators is used, the number of which is measured in tens and reaches hundreds. It is unrealistic to obtain identical indicators in such quantity from a competing enterprise for their comparison. At the same time, some indicators are insignificant and have little effect on the level of competitiveness of the enterprise, but the analysis of their significance is not carried out. As V. E. Goryunov notes [9], “even if it were possible to establish an absolutely complete list of competitiveness factors, then, according to systems theory, the assessment of the properties of an object based on the assessment of its extremely elementary components does not ultimately give an adequate assessment of the object under consideration, since these elementary components determine the properties of the object not autonomously, but in combination, in interaction with each other, which is not taken into account when assessing the object under study element by element”. In addition, an excessive increase in the number of competitiveness factors (in the case of a theoretical assumption of the possibility of forming an absolutely complete list of factors) leads to the fact that the laboriousness of their mathematical processing becomes extremely high, and the task of collecting the necessary data is practically impossible, which significantly reduces the practical applicability of such methods of assessing the competitiveness of enterprises.

An analysis of competitiveness assessment methods also showed that almost all authors are trying to develop universal methods with universal indicators that can be applied to enterprises of any industry, of any type and scale of production. The noted shortcomings of existing approaches to assessing the competitiveness of enterprises limit the possibility of their prac-

tical application for assessing the competitiveness of enterprises that differ in the specifics of production activities, which include the mining industry. This circumstance requires an industry – specific approach to assessing competitiveness, which the proposed methodological tools implement.

Results

The main requirements for the methodology for assessing the competitiveness of a mining enterprise are as follows:

1. The methodology should use the minimum possible number of indicators provided with the necessary information;
2. The system of indicators should reflect natural resource, environmental, social and institutional factors;
3. The methodology for each industrial type of minerals (combustible, metallic, non-metallic, fresh and mineral waters), the scale of the deposit (small, medium, large, unique) should include the use of a specific set of indicators;
4. The methodology should take into account not only internal, but also external factors.

To assess the competitiveness of enterprises, the calculation and interpretation of integral indicators are used. With their help, the whole set of economic, technological, organizational and other factors is taken into account. The influence of these factors is reflected through quantitative and, in some cases, qualitative private indicators. The evaluation procedure is carried out by calculation and expertise. Experts conduct an intuitive-logical analysis of the problem with a quantitative assessment of judgments and formal processing of the results. The problem of determining the competitiveness of mining enterprises belongs to the class of problems with sufficient awareness. Hence the generalized opinion of the expert group is close to the true one.

Experts establish and compare groups of the most significant positive and negative factors of the competitiveness of mining enterprises:

$$F_p = F_n, F_p > F_n, F_p < F_n,$$

where F with indices “p” and “n” are positive and negative factors of competitiveness. The most preferable condition for a positive assessment: positive factors are greater than negative factors. For the selection of factors, it is proposed to take into account the main specific features of the industry:

1. The amount of mineral resources, including technogenic waste, off-balance reserves (reserves that cannot be used at the present time due to imperfect technologies, low prices, lack of demand for raw materials, etc.);

2. Mining and geological conditions of mining;
3. The quality of the mineral;
4. Technogenic and environmental impacts during mining;
5. Institutional environment (a set of legal, social, political and economic rules that define the scope of the enterprise);
6. Dependence on world prices for products.

The choice of factors is carried out on the basis of a comprehensive analysis of the work of the industry, individual enterprises, the study of scientific and reference literature. According to the results of an expert survey of specialists, for a comparative assessment of the competitiveness of enterprises developing gold deposits, 12 significant factors with approximately equal significance were proposed for the conditions of the pre-project stage (table 1).

Positive factors:

$$a_1, a_2 \dots a_i;$$

a_1 – estimated indicator – profit to cost ratio (cost effectiveness ROTC – total cost); a_2 – sufficient geological knowledge (reserves of the deposit of higher categories according to the current classification; if there are reserves of lower categories, they are transferred to higher ones according to the presented coefficients), a score factor; a_3 – prospects for replenishment of reserves (reproduction of the mineral resource base); a_4 – favorable mining and geological and hydrological conditions; a_5 – estimated indicator of the minimum industrial content of useful components in the ore in comparison with the average for the industry; a_6 – the presence of unused waste with valuable consumer properties;

Negative factors:

$$b_1, b_2 \dots b_i;$$

b_1 – unfavorable environmental situation around the enterprise; b_2 – presence of mining risks; b_3 – environmental risks (impossibility to comply with environmental regulations); b_4 – presence of hazardous waste; b_5 – administrative risks (the possibility of temporary suspension and even a complete ban on production activities by government departments and bodies exercising control and supervision over the safe conduct of work, compliance with sanitary and economic standards, fire safety standards, etc., interaction of the enterprise with government structures in the process of production activities); b_6 – a significant proportion of lagging technology.

Factor b_5 is external, the rest are internal.

Depending on the method of development (underground, open, geotechnological, underwater), type of mineral, produc-

Table 1. Factors of competitiveness of mining enterprises

Таблица 1. Факторы конкурентоспособности горнодобывающих предприятий

Positive factors	Negative factors
a_1 – field development profitability	b_1 – unfavorable environmental situation around the enterprise
a_2 – sufficient geological knowledge	b_2 – presence of mining risks
a_3 – availability of replenishment prospects	b_3 – presence of environmental risks
a_4 – favorable mining and geological and hydrological conditions	b_4 – presence of hazardous waste
a_5 – high minimum industrial content of useful components in the ore	b_5 – administrative risks
a_6 – the presence of unused waste with valuable consumer properties	b_6 – a significant proportion of lagging technology

tion capacity of the enterprise, the main factors of the enterprise's competitiveness may be different. To obtain the same type of indicators, the desirability function of E. K. Harrington is used, according to which the evaluated factors will receive a point score. The formula for calculating the generalized indicator of competitiveness is as follows:

$$D = d_1 + d_2 + \dots + d_p \quad (1)$$

where D – generalized indicator of competitiveness.

Ultimately, in the evaluation process, a generalized indicator is obtained that characterizes the system of evaluated factors with the help of private indicators.

The second criterion indicator is additional profit, the third one is profitability related to the use of off-balance reserves and waste, which increase the mineral resource base of the enterprise [10]. To calculate them, the size of the cost of additional production, the cost of obtaining it, profit, profitability of mining is determined, which are calculated taking into account the extraction of metal from the tailings of ore processing, off-balance reserves, and overburden processing (mainly rock mass). In the process of calculations for specific deposits, individual indicators are adjusted:

– the reliability of the deposit reserves is taken into account; for this, reserves are adjusted according to the recommended reliability factors [11];

– the value of the deposit reserves is calculated taking into account the increase in value due to the additional volume of mineral resources (off-balance reserves, mining and processing waste);

– for a group of precious metals, the prices for which are characterized by a very significant volatility of the market rate, a sensitivity analysis of the financial indicators of the enterprise to changes in world prices for products is carried out or the price of the metal is adjusted for the estimated price risk.

Competitiveness is assessed by the degree to which the maximum value of the generalized indicator of competitiveness and the maximum indicators related to additional products have been achieved. As a method that facilitates the search for the best option, a method is proposed for evaluating decisions by the degree to which a given set of goals is achieved [12]. The essence of the method lies in the fact that the effectiveness is evaluated by the degree of achievement of a given combination of target criteria indicators. Each solution is considered as a point in the n -dimensional Euclidean space, the

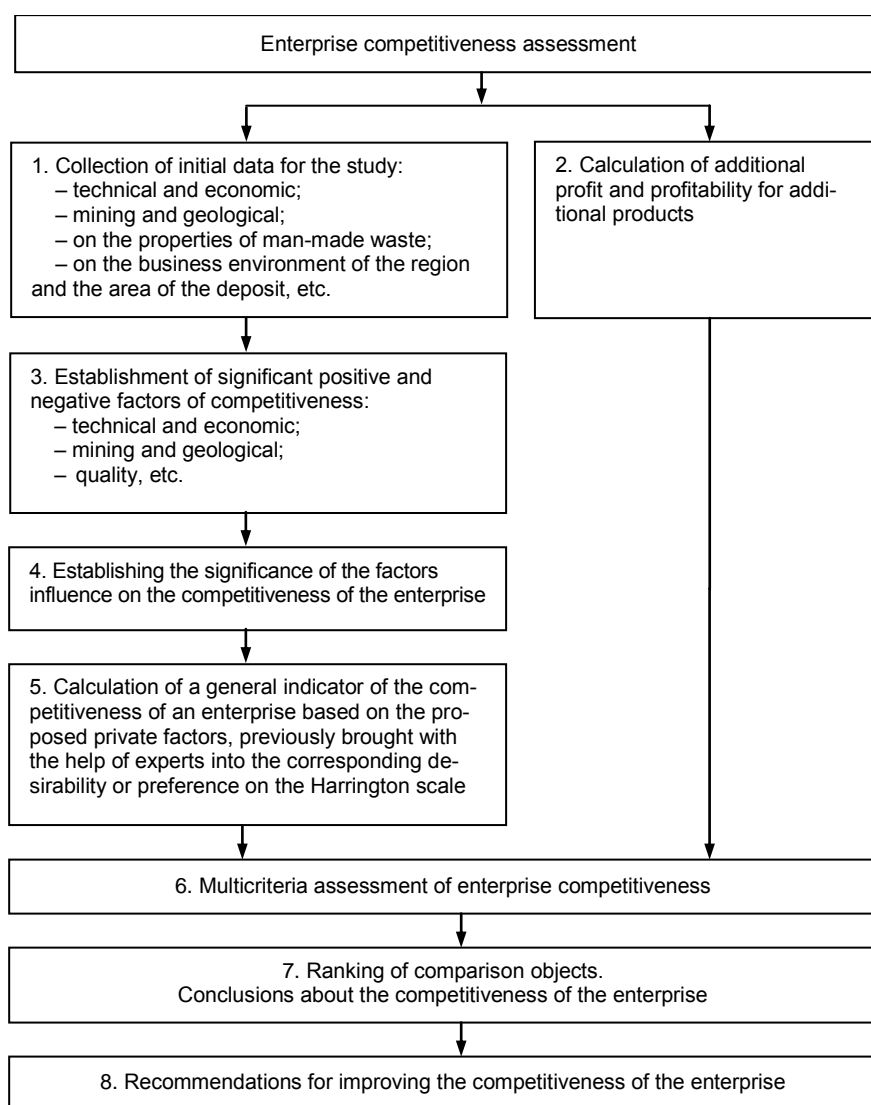


Figure 1. Algorithm for assessing the competitiveness of a mining enterprise
Рисунок 1. Алгоритм оценки конкурентоспособности горнодобывающего предприятия

coordinates of which are determined by the values of the target indicators involved in the comparison procedure. The selected solution is evaluated by the degree of remoteness of the latter from the reference point, which is characterized by the vector of the best values of partial indicators. The weighting of the target indicators is taken into account by the corresponding coefficients k , the value of which is established by an expert:

$$p_i = \sqrt{k_1 \left(1 - \frac{a_{i1}}{a_1^e}\right)^2 + k_2 \left(1 - \frac{a_{i2}}{a_2^e}\right)^2 + \dots + k_n \left(1 - \frac{a_{in}}{a_n^e}\right)^2}, \quad (2)$$

where p_i – the distance of each of the compared options to the reference point; a_1, a_2, \dots, a_n – set of coordinates (numerical values of target indicators) of the i -th option in n -dimensional space; k_1, k_2, \dots, k_n – weighting coefficients of targets; $a_1^e, a_2^e, \dots, a_n^e$ – reference point coordinate set.

According to the results of the analysis using the Harrington desirability function, the most competitive enterprise has undoubted competitive advantages that provide leadership in the market now and in the future, as it will have real financial opportunities to realize its innovative potential, to access advanced technologies, to move to new technological order [13, 14].

The algorithm for assessing the competitiveness of a mining enterprise is shown in fig. 1:

1. Collection of data on the deposit or deposits under study, based on the geological information available to subsoil users about the subsoil, the location of the subsoil plot and the results of calculations of technological and economic indicators for the development of the reserves of the subsoil plot;
2. Calculation of the main economic indicators, taking into account the receipt of additional products of the mining enterprise;

3. Establishment of a list of the most significant technical and economic, mining and geological and other factors that positively and negatively affect the competitiveness of mining enterprises using the expert method;

4. Determining the significance of the influence of factors on the competitiveness of mining enterprises using an ordinal scale with points according to the degree of influence of factors;

5. Calculation of a general indicator of the competitiveness of an enterprise based on the proposed private factors, previously brought with the help of experts into the corresponding desirability or preference on the Harrington scale (formula (1));

6. Multi-criteria assessment of the level of enterprise competitiveness (formula (2));

7. When assessing the competitiveness of several enterprises, ranking enterprises according to the level of competitiveness, choosing the best option;

8. Substantiation of ways to increase the competitiveness of a mining enterprise and practical recommendations.

Approbation of methodological tools was carried out for the enterprise “Peshchernoye”, which develops a gold deposit, in comparison with three other enterprises (“Altyntash”, “Yagodnoye” and “Shilovskoye”) [15].

Determination of the competitiveness conditions of the assessed mining enterprises in terms of positive and negative factors is presented in table 2.

During the evaluation, the experts were guided by the materials of pre-project studies on the listed gold deposits (feasibility study of conditions, environmental impact assessment, development project). When assessing, the experts took into account general practical recommendations and the specific features of each field. The calculation of the generalizing indicator of competitiveness is presented in table 3.

Table 2. Determining the conditions for the competitiveness of mining enterprises

Таблица 2. Определение условий конкурентоспособности горнодобывающих предприятий

Enterprise	Factors					
	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
	<i>In terms of positive factors</i>					
Altyntash	0,7	0,8	0,5	0,5	0,5	0,9
Peshchernoye	1,0	0,3	0,5	0,2	0,9	0,9
Shilovskoye	0,9	0,6	0,5	0,2	0,5	0,5
Yagodnoye	0,8	0,3	0,7	0,5	0,5	0,7
Enterprise	Factors					
	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6
	<i>In terms of negative factors</i>					
Altyntash	0,5	0,3	0,7	0,3	0,9	0,7
Peshchernoye	0,5	0,5	0,3	0,3	0,5	0,7
Shilovskoye	0,3	0,3	0,3	0,3	0,5	0,5
Yagodnoye	0,9	0,3	0,9	0,3	0,5	0,5

Table 3. Calculation of the general indicator of competitiveness

Таблица 3. Расчет обобщающего показателя конкурентоспособности

Enterprise	Positive factors	Negative factors	Total d
Altyntash	0,7; 0,8; 0,5; 0,5; 0,5; 0,9	-0,5; -0,3; -0,7; -0,3; -0,9; -0,7	0,5
Peshchernoye	1,0; 0,3; 0,5; 0,2; 0,9; 0,9	-0,5; -0,5; -0,3; -0,3; -0,5; -0,7	1,0
Shilovskoye	0,9; 0,6; 0,5; 0,2; 0,5; 0,5	-0,3; -0,3; -0,3; -0,3; -0,5; -0,5	1,0
Yagodnoye	0,8; 0,3; 0,7; 0,5; 0,5; 0,7	-0,9; -0,3; -0,9; -0,3; -0,5; -0,5	0,1

Table 4. Economic indicators of additional products**Таблица 4. Экономические показатели дополнительной продукции**

Enterprise	Products from tailings ¹ , kg	Cost, million rubles	Products			Refining costs ³ , million rubles	Rock building materials ⁴ , million m ³	Cost, million rubles	Costs, million rubles	Total cost, million rubles	Total costs, million rubles	Total additional profit, million rubles	Return on costs, %
			Refining costs ² , million rubles	from off-balance reserves, kg	Cost, million rubles								
Altyntash	1101,6	2477,5	1085,0	1119,1	2516,8	2243	1,877	844,6	523,6	5838,3	3644,0	2184,2	60
Peshchernoje	792,0	1781,2	646,0	–	–	–	1,988	894,8	567,0	2676,0	1213,1	1462,7	120
Shilovskoye	261,3	465,6	185,2	639,6	1463,0	1241	0,380	171,1	105,7	2099,0	1532,0	567,0	37
Yagodnoje	684,0	1577,3	565,0	637,5	1438,0	1217	1,167	525,1	320,0	3536,0	2213,0	1323,0	60

Note:

1. Extraction of metals from tailings using the most promising methods (for example, chlorinated roasting) accepted 80% (practically can reach 95%), losses 10%;
2. The cost of processing 1 ton of sand from the tailing dump is 750 rubles (by analogues);
3. The development and processing of off-balance reserves is identical to the processes of development and processing of reserves, due to the low metal content, the increased consumption of reagents is taken into account by a factor of 1.1;
4. Processing is possible in the amount of 70% of the volume of rock overburden, bulk density (bulk weight) 1380 kg/m³, price 450 rubles/m³, self-delivery.

Table 5. Multicriteria assessment of competitiveness**Таблица 5. Многокритериальная оценка конкурентоспособности**

Enterprise	Calculation formula	Multicriteria assessment indicator
Altyntash	$\rho_A = \sqrt{0,7 \left(1 - \frac{0,5}{1}\right)^2 + 0,15 \left(1 - \frac{60}{120}\right)^2 + 0,15 \left(1 - \frac{2184,2}{2184,2}\right)^2}$	0,46
Peshchernoje	$\rho_P = \sqrt{0,7 \left(1 - \frac{1}{1}\right)^2 + 0,15 \left(1 - \frac{120}{120}\right)^2 + 0,15 \left(1 - \frac{1462,7}{2184,2}\right)^2}$	0,13
Shilovskoye	$\rho_{Sh} = \sqrt{0,7 \left(1 - \frac{1}{1}\right)^2 + 0,15 \left(1 - \frac{37}{120}\right)^2 + 0,15 \left(1 - \frac{567}{2184,2}\right)^2}$	0,39
Yagodnoje	$\rho_{Ya} = \sqrt{0,7 \left(1 - \frac{0,1}{1}\right)^2 + 0,15 \left(1 - \frac{60}{120}\right)^2 + 0,15 \left(1 - \frac{1323}{2184,2}\right)^2}$	0,79

Additionally, the profit and profitability of additional products is calculated. The costs of obtaining it are calculated taking into account the extraction of metal from ore processing tailings, off-balance reserves, processing of rock mass for building materials (where adjustments for the price of the metal are taken into account). The extraction of silver from tailings and off-balance reserves, due to its low content and insignificant price compared to gold, will be obviously unprofitable. The results of calculations for the economic indicators of additional production are presented in table 4. The effectiveness of the development of compared enterprises is evaluated by the degree to which a given combination of target indicators is achieved.

Each solution variant is considered as a point in the n -dimensional Euclidean space, the coordinates of which are determined by the values of the criteria indicators involved in the comparison procedure. The selected solution is evaluated by the degree of remoteness of the latter from the location of the

reference point, which is characterized by the vector of the best values of the indicators. The weighting of the criteria indicators is assumed to be 0.7; 0.15; 0.15 (table 5).

According to the set of target indicators, the Peshchernoje deposit has the highest level of competitiveness.

Conclusions

The developed methodology and algorithm for assessing the competitiveness of mining enterprises, which are sectoral in nature, involve the combination of scoring and cost approaches and the use of a multi-criteria assessment of decisions made, which increases the reliability of the results and provides sufficient information support for making managerial decisions. Approbation of the proposed methodological approaches on the example of a number of enterprises in the gold mining industry has demonstrated the possibility of their practical application for solving applied problems related to assessing the com-

petitiveness of enterprises and the rational use of mineral resources. This technique can also be presented as a technique for assessing the investment attractiveness of a mining enterprise.

Статья подготовлена в соответствии с планом НИР ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет» и ФГБУН Институт экономики УрО РАН на 2023 год.

REFERENCES

1. Ricardo D. 2016, Principles of political economy and taxation. Moscow, 1040 p. (*In Russ.*)
2. Milgrom D. A. 1999, Assessment of the competitiveness of economic technologies. *Marketing v Rossii i za rubezhom* [Journal of Marketing in Russia and Abroad], no. 2, pp. 98–116. (*In Russ.*)
3. Nurmaganbetov K. R., Esmagulova N. D. 2009, Competitive power estimation policy of enterprises for the light industry. *Organizator proizvodstva* [Organizer of production], no. 2, pp. 90–93. (*In Russ.*)
4. Tselikova L. V. 2000, Competitiveness of Market Entities and the Mechanism for Its Evaluation. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 6. Ekonomika* [Moscow university economics bulletin. Series 6. Economics], no. 2, pp. 57–67. (*In Russ.*)
5. Krivorotov V. V. 2007, Methodology for the formation of a mechanism for managing the competitiveness of an enterprise. Ekaterinburg, 238 p. (*In Russ.*)
6. Voronov D. S. 2014, Dynamic approach to assessing the competitiveness of enterprises. *Marketing v Rossii i za rubezhom* [Journal of Marketing in Russia and Abroad], no. 5, pp. 92–102. (*In Russ.*)
7. Porter M. E. 1998, Competitive Advantage: Creating and Sustaining Superior Performance. 2nd ed. N. Y., 592 p.
8. Polyanichkin Yu. A. 2012, Methods for assessing the competitiveness of enterprises. *Biznes v zakone. Ekonomiko-yuridicheskiy zhurnal* [Business in Law. Economic and legal journal], no. 3, pp. 191–194. (*In Russ.*)
9. Goryunov E. V. 2012, Vector rating method. *Ekonomicheskiy analiz: teoriya i praktika* [Economic analysis: theory and practice], no. 16 (271), pp. 13–17. (*In Russ.*)
10. Kosolapov O. V., Ignat'eva M. N. 2014, Conceptual positions of environmental sustainability at the life cycle of mining enterprise. *Vestnik UrFU. Ser. Ekonomika i upravleniye* [Bulletin of Ural federal university. Series economics and management], no. 4, pp. 108–118. (*In Russ.*)
11. Shaklein S. V., Rogova T. B. 2010, Ways to improve the Russian system of assessing reliability of mineral reserves in terms of ensuring mining safety. *Mineral'nyye resursy Rossii* [Mineral resources of Russia. Economics and management], no. 6, pp. 19–24. (*In Russ.*)
12. Geoffrion A., Dyer J., Fainberg A. 1975, Solving optimization problems under multiple criteria based on human-machine procedures. Problems of analysis and decision-making procedures. Moscow, pp. 38–42. (*In Russ.*)
13. Lyubushin N. P., Brikach G. E. 2014, Using the Generalized Harrington Desirability Function in Multi-Parameter Economic Problems. *Ekonomicheskiy analiz: teoriya i praktika* [Economic analysis: theory and practice], no. 18 (369), pp. 2–10. (*In Russ.*)
14. Bulgakova I. N., Morozov A. N. 2009, Using “function of desirability” for formalizing a complex indicator of industrial enterprise competitiveness. *Vestnik VGU. Seriya: ekonomika i upravleniye* [Proceedings of Voronezh state university. Series: economics and management], no. 2, pp. 54–56 (*In Russ.*)
15. Sokolov A. S. 2022, Methodological tools for assessing the competitiveness of mining enterprises, PhD thesis. Ekaterinburg. 147 p.

The article was received on January 23, 2023

Методический инструментарий оценки конкурентоспособности предприятий горнопромышленного комплекса

Александр Сергеевич СОКОЛОВ^{1*}
Алексей Владимирович ДУШИН^{1**}
Валерий Васильевич БАЛАШЕНКО^{1,2***}
Олег Валерьевич ГЕНЗЕЛЬ^{1****}

¹Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия

²Институт экономики УрО РАН, Екатеринбург, Россия

Аннотация

Актуальность. Минерально-сырьевой комплекс России остается базисом устойчивого развития государства и его конкурентным преимуществом в мировой торговле. По-прежнему до 70 % валютной выручки РФ формируется благодаря его продукции, включая металлургию. Горнодобывающая отрасль является системообразующей для национальной экономики, определяя эффективность и характер развития смежных секторов, обеспечивает решающий вклад в формирование стабилизационного фонда и золотовалютных резервов страны. Конкурентоспособность страны (национальная конкурентоспособность) складывается из конкурентоспособности регионов, отраслей, предприятий и организаций, способности их завоевывать и укреплять ведущие позиции на внутренних и зарубежных рынках. Управление конкурентоспособностью требует постоянно оценки этого параметра.

Цель исследования – разработка методического инструментария оценки конкурентоспособности горнодобывающих предприятий с учетом отраслевого подхода.

Методы исследования. В работе использованы общенаучные методы анализа и синтеза, программно-целевого подхода, экономического, логического и логико-структурного анализа, методы сравнения, аналогии, экспертных оценок.

Результаты. В статье приводятся результаты анализа методов, используемых для оценки конкурентоспособности, и обоснование необходимости отраслевого подхода к выполнению оценочных процедур. Предлагается система частных оценочных факторов, характеризующих конкурентоспособность горнодобывающих предприятий с учетом специфики их производственной деятельности. Доказывается целесообразность обращения к сравнительной оценке по шкале желательности Харрингтона, введения в процедуру оценки показателей прибыли и рентабельности дополнительной продукции и расчета интегрального показателя. Предлагаемый методический инструментарий апробирован для условий четырех золоторудных предприятий.

Выводы. Предлагаемый методический инструментарий позволяет получать наиболее достоверные оценки конкурентоспособности горнодобывающих предприятий, учитывающие специфику производственной деятельности последних. Особо следует отметить возможность использования разработанного методического инструментария для оценки инвестиционной привлекательности предприятий горнопромышленного комплекса.

Ключевые слова: конкурентоспособность, горнодобывающие предприятия, методический инструментарий, факторы, интегральный показатель, алгоритм.

Статья подготовлена в соответствии с планом НИР ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет» и ФГБУН Институт экономики УрО РАН на 2023 год.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рикардо Д. Начала политической экономии и налогового обложения. М.: Эксмо, 2016. 1040 с.
2. Мильгром Д. А. Оценка конкурентоспособности экономических технологий // Маркетинг в России и за рубежом. 1999. № 2. С. 98–116.
3. Нурмаганбетов К. Р., Есмагулова Н. Д. Методика оценки конкурентоспособности предприятия легкой промышленности // Организатор производства. 2009. Вып. 2. С. 90–93.
4. Целикова Л. В. Конкурентоспособность субъектов рынка и механизм ее оценки // Вестник Московского университета. Сер. 6. Экономика. 2000. № 2. С. 57–67.
5. Криворотов В. В. Методология формирования механизма управления конкурентоспособностью предприятия. Екатеринбург: Изд. УГТУ – УПИ, 2007. 238 с.
6. Воронов Д. С. Динамический подход к оценке конкурентоспособности предприятий // Маркетинг в России и за рубежом. 2014. № 5. С. 92–102.
7. Porter M. E. Competitive Advantage: Creating and Sustaining Superior Performance. 2nd ed. N. Y.: The Free Press, 1998. 592 p.

✉alexander-sokolov@mail.ru

**dushin.a@list.ru

***bala10@mail.ru

****ief.em@m.ursmu.ru, ief.etp@m.ursmu.ru

8. Поляничкин Ю. А. Методы оценки конкурентоспособности предприятий // Бизнес в законе. Экономико-юридический журнал. 2012. № 3. С. 191–194.
9. Горюнов Е. В. Векторный метод рейтинговой оценки // Экономический анализ: теория и практика. 2012. № 16(271). С. 13–17.
10. Косолапов О. В., Игнатъева М. Н. Концептуальные положения обеспечения экологической устойчивости на этапах жизненного цикла горного предприятия // Вестник УрФУ. Сер.: Экономика и управление. 2014. № 4. С. 108–118.
11. Шаклеин С. В., Рогова Т. Б. Направления совершенствования российской системы оценки достоверности запасов твердых полезных ископаемых в контексте обеспечения безопасности горных работ // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2010. № 6. С. 19–24.
12. Джоффрион А., Дайер Дж., Файнберг А. Решение задач оптимизации при многих критериях на основе человеко-машинных процедур // Вопросы анализа и процедуры принятия решений. М.: Мир, 1975. С. 38–42.
13. Любушин Н. П., Брикач Г. Е. Использование обобщенной функции желательности Харрингтона в многопараметрических экономических задачах // Экономический анализ: теория и практика. 2014. № 18(369). С. 2–10.
14. Булгакова И. К., Морозов А. Н. Использование «функции желательности» для формализации комплексного показателя конкурентоспособности промышленного предприятия // Вестник ВГУ. Сер.: Экономика и управление. 2009. № 2. С. 54–56.
15. Соколов А. С. Методический инструментарий оценки конкурентоспособности горнодобывающих предприятий: дис. ... канд. экон. наук. Екатеринбург. 2022. 147 с.

Статья поступила в редакцию 23 января 2023 года

Влияние горнодобывающих предприятий на налоговые доходы бюджета Республики Коми

Ирина Григорьевна БУРЦЕВА*
Евгений Николаевич ТИМУШЕВ**

Институт социально-экономических и энергетических проблем Севера Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Республика Коми, Россия

Аннотация

Актуальность. Проблемы изъятия природной ренты при разработке месторождений полезных ископаемых являются актуальными на протяжении всей истории освоения природных ресурсов и особенное значение они приобретают на современном этапе, когда запрос на справедливое распределение доходов выходит на первый план экономического и политического развития общества. Задача определения обоснованной экономической оценки минерального сырья – одна из наиболее сложных для решения в сфере экономики природопользования в силу огромного разнообразия месторождений полезных ископаемых, трудно поддающихся унификации, волатильности цен, дифференцированных экономических условий освоения и др.

Цель исследования – определение степени изъятия потенциальной ценности минерального сырья в недрах посредством налоговых поступлений, генерируемых горными предприятиями республики.

Методы исследования. При проведении исследования использовались методы экономического и статистического анализа, экономико-географического анализа, использовались монографический, абстрактно-логический, аналитический, системный подходы.

Результаты. В ходе исследования была выполнена стоимостная оценка минерально-сырьевого потенциала Республики Коми, которая базировалась на методических рекомендациях Всероссийского научно-исследовательского геологического института имени А. П. Карпинского (ВСЕГЕИ), специалистов в области оценки минерального сырья и авторской методике. Проведен анализ основных подходов налоговой политики в мировой практике, который при всех существующих различиях между странами свидетельствует о главной цели фискальной политики налогообложения горнодобывающих отраслей – максимальном изъятии прибыли с сохранением заинтересованности предпринимателей в продолжении высокорискового горного бизнеса. В работе рассматривались налоговые доходы, сформированные в добывающем секторе экономики региона, которые были сопоставлены с основными макроэкономическими показателями Республики Коми и Российской Федерации, а также полученными результатами стоимостной оценки минерально-сырьевого потенциала.

Выводы. В результате исследования показана двоякая роль налогообложения горнодобывающей промышленности – подавляющее большинство налоговых доходов формируется в минерально-сырьевом секторе, но существующие бюджетные правила приводят к тому, что на уровне региона их роль существенно снижена. Это должно послужить стимулом для расширения возможностей освоения месторождений местного сырья, доходы от разработки которых служат источником пополнения регионального бюджета.


Ключевые слова: ресурсная рента, минеральные ресурсы, экономическая оценка, регион, Республика Коми, налоги, налоговая политика, горнодобывающая промышленность, горные предприятия, месторождения полезных ископаемых.

Введение


Одной из центральных задач стоимостной оценки минерального сырья является определение справедливого размера ресурсной ренты и социально-экономической отдачи от освоения недр. Горнодобывающий сектор играет важную роль в целом ряде стран, обеспечивая источник доходов от экспорта, а также государственных доходов за счет механизмов налогообложения полезных ископаемых. Цель политики налогообложения полезных ископаемых состоит в том, чтобы позволить правитель-

ствам получать разумную прибыль от добычи полезных ископаемых в сообществе, обеспечивая при этом экономическую эффективность горнодобывающих отраслей и разумные административные расходы. Наиболее важным вопросом фискальной политики является обеспечение справедливой доли государства в рентной плате за ресурсы, при этом подразумевается такое распределение, которое дает инвесторам достаточный стимул для разведки и разработки. Природная рента представляет собой такую

✉ burtseva@iespn.komisc.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-8941-6587>

**timushev@iespn.komisc.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-5220-3841>

налоговую базу, которая теоретически может облагаться 100 %-ным налогом без создания убытков при ведении хозяйственной деятельности [1]. Этим определяется целесообразность сопоставления стоимостных оценок минерального сырья региона с уровнем налоговых поступлений, формируемых в добывающих отраслях.

В общих чертах механизмы налогообложения полезных ископаемых можно классифицировать в зависимости от того, основаны ли они на прибыли или на объеме производства [2]:

– роялти на основе прибыли взимаются с чистого денежного потока или некоторой меры прибыли от горнодобывающего проекта;

– адвалорные роялти представляют собой роялти, основанные на объемах производства, которые взимаются в виде процента от стоимости продукции горнодобывающего проекта;

– конкретные или основанные на единице добытого сырья роялти – роялти на основе объема производства, взимаемые в виде установленной платы за физическую единицу продукции горнодобывающего предприятия.

Механизмы налогообложения полезных ископаемых существенно различаются между странами и полезными ископаемыми. В странах с развитой экономикой механизмы налогообложения полезных ископаемых в основном основаны на прибыли или адвалорных роялти, в развивающихся странах механизмы налогообложения полезных ископаемых в основном представлены адвалорными роялти в Африке и Латинской Америке, а также комбинациями специфических и адвалорных роялти в странах Азии и Тихоокеанского региона. Мировой опыт налогообложения добывающей промышленности подобно рассматривается в работах [3–12].

Результаты и обсуждение

В России по действующему законодательству (Закон Российской Федерации (РФ) «О недрах», Налоговый кодекс РФ, 2 часть) при недропользовании осуществляются выплаты следующих основных видов ресурсных налогов и платежей:

1. Разовые платежи за пользование недрами;
2. Регулярные платежи за пользование недрами (ренталс);
3. Налог на добычу полезных ископаемых (НДПИ), роялти;
4. Акцизы и таможенные пошлины на минеральное сырье.

Разовые платежи за пользование недрами. Недропользователи, получившие право на пользование недрами, оплачивают разовые платежи за их использование. Минимальные (стартовые) размеры разовых платежей за пользование недрами устанавливаются в размере не менее 10 % от величины суммы налога на добычу полезных ископаемых в расчете на среднегодовую проектную мощность добывающей организации. Окончательные размеры разовых платежей за пользование недрами устанавливаются по результатам конкурса или аукциона и фиксируются в лицензии на пользование недрами. Следует отметить, что в США доля подобных платежей в отдельные годы составляет четвертую часть бюджетных поступлений от нефтяной промышленности [13].

Регулярные платежи за пользование недрами. Регулярные платежи за пользование недрами взимаются за предоставление пользователям недр исключительных прав на поиск, оценку и разведку месторождений полезных ископаемых. Регулярные платежи за пользование недрами взимаются с пользователей недр отдельно по каждому виду работ. Размеры регулярных платежей за пользование недрами определяются в зависимости от экономико-географических условий, размера участка недр, вида полезного ископаемого, продолжительности работ, степени геологической изученности территории и степени риска. Ставка регулярного платежа за пользование недрами устанавливается за один квадратный километр площади участка недр в год.

Налог на добычу полезных ископаемых. Налог взимается с недропользователей, осуществляющих добычу полезных ископаемых. Ставки налогообложения предусмотрены в главе 26, части второй Налогового кодекса Российской Федерации. Налогообложение производится по налоговой ставке по видам полезных ископаемых, налоговые ставки по углеводородному сырью определяются по специальной формуле, учитывающей рыночную цену, валютный курс и т. д. Распределение налога на добычу между федеральным и территориальными бюджетами осуществляется в соответствии с Бюджетным кодексом РФ, законом «О федеральном бюджете». Налог на добычу нефти и природного газа в полном объеме предусмотрен в качестве источника формирования доходов федерального бюджета. Налог на добычу общераспространенных полезных ископаемых в полной сумме поступает в бюджеты субъектов Российской Федерации.

Акцизы на минеральное сырье и таможенные пошлины. По действующему Налоговому кодексу РФ акцизами облагаются природный газ, нефтяное сырье, сталь жидкая. Налогообложение природного газа осуществляется по налоговой ставке 30 % от стоимости реализованного газа, ставка акциза на нефтяное сырье определяется налогоплательщиком в рублях за 1 т по формуле, учитывающей цену нефти, курс доллара, а также ряд других коэффициентов. Акциз на жидкую сталь также определяется по формуле, с учетом цены и валютного курса. Экспортная пошлина на нефть в РФ с 1 июля 2022 г. составляет 55,2 долл. за 1 т по данным Минфина РФ. Наиболее значимыми из перечисленных платежей являются налог на добычу полезных ископаемых, акцизы и таможенные пошлины. По данным за 2021 г., доля НДПИ и акцизов составила почти четверть налоговых поступлений, администрируемых Федеральной налоговой службой (8,0 трлн руб. из 28,1 трлн руб.), тогда как, например, в Китае ресурсный налог, аналог российского НДПИ, не превышает 1 % общих налоговых поступлений, несмотря на лидирующие позиции Китая в мировом рейтинге по ресурсному потенциалу [14].

Доходы от налогообложения полезных ископаемых составляют значительную долю общих налоговых поступлений в ряде стран – в частности, за период 2000–2005 гг. эта доля составляла 62,5 % в Ботсване, 17,9 % в Папуа – Новой Гвинее, 17,8 % в Гвинее [2]. В России доля всех налогов и платежей, сгенерированных в отраслях, связанных с разработкой месторождений полезных ископаемых (табл. 1), также весьма внушительна.

Таблица 1. Налоговые платежи минерально-сырьевого сектора в общем объеме поступлений в доход консолидированного бюджета Российской Федерации**Table 1. Tax payments of the mineral and raw materials sector in the total volume of revenues to the income of the consolidated budget of the Russian Federation**

Налоговые платежи	Год	
	2020	2021
Поступило налоговых платежей в бюджетную систему Российской Федерации всего, млрд руб.	20 713,7	28 129,2
В том числе по Республике Коми	176,5	416,3
По видам деятельности, связанным с добычей и переработкой полезных ископаемых	6910,9	11 881,5
В том числе по Республике Коми	110,4	332,2
Доля платежей, связанных с добычей и переработкой полезных ископаемых в общем объеме платежей в консолидированном бюджете Российской Федерации, %	33,3	42,2
В том числе по Республике Коми	62,5	79,8
Вывозные таможенные пошлины, млрд руб.	1131,5	2224,6

Таблица 2. Основные экономические показатели, характеризующие степень влияния минерально-сырьевого комплекса на экономику Республики Коми**Table 2. Main economic indicators characterizing the degree of influence of the mineral resource complex on the economy of the Komi Republic**

Основные экономические показатели	Год			
	2017	2018	2019	2020
Валовой региональный продукт (в текущих ценах), млрд руб.	608,6	696,2	720,7	612,1
В том числе добыча полезных ископаемых, млрд руб.	213,4	293,7	314,6	200,7
Основные фонды по видам экономической деятельности (на конец года; по полной учетной стоимости), млрд руб.	3207,3	3359,3	4141,4	4239,8
В том числе добыча полезных ископаемых	732,4	795,8	855,6	839,3
Доходы консолидированного бюджета РК, млрд руб.	71,0	83,9	86,3	89,9
В том числе налог на добычу полезных ископаемых	0,41	0,388	0,514	0,301
Доля налога на добычу полезных ископаемых в доходах консолидированного бюджета РК	0,5	0,5	0,6	0,3
Налоги и платежи, сгенерированные в отраслях, связанных с разработкой месторождений полезных ископаемых, всего по РК, млрд руб.	104,8	155,7	159,3	110,4
В том числе поступившие в региональный бюджет	10,9	13,5	11,7	14,3
Доля налогов, поступивших в региональный бюджет в общем объеме налогов, сформированных в минерально-сырьевом секторе	10,4	8,6	7,3	13,0
Рентные платежи, млрд руб.	84,0	132,3	134,1	81,5
Из них:				
НДПИ	84,0	132,3	133,6	81,5
Экспорт минерального сырья, млн долл. США	373,3	330,1	393,5	205,5
Доля экспорта минерального сырья в общем объеме республиканского экспорта, %	38	32	39	25
Стоимость экономически активных запасов, млрд руб.		6861,3		

Горнодобывающий сектор играет ведущую роль в экономике Республики Коми. В табл. 2 приведены основные макроэкономические показатели экономики региона и их связь с минерально-сырьевым комплексом.

Данные таблицы, с одной стороны, свидетельствуют о значимости сырьевого сектора для экономики региона, который обеспечивает 33 % валового регионального продукта, четвертую часть республиканского экспорта, составляет 20 % основных фондов, формирует 80 % налоговых платежей. С другой стороны, по существующим бюджетным правилам большая часть

налогов, в числе которых наиболее весомый налог на добычу полезных ископаемых в части углеводородного сырья, изымается в федеральный бюджет, поэтому доля платежей, обеспечиваемых добычей полезных ископаемых, довольно невелика – она составляет от 10 до 14 % от общей суммы налогов, сгенерированных в минерально-сырьевом секторе. Доходы, поступающие от сырьевых отраслей в консолидированный бюджет Республики Коми, сопоставимы с доходами торговых предприятий, строительства, обработки древесины. Налог на добычу полезных ископаемых, остающийся в регионе, не превышает одного процента в бюджетных



Рисунок 1. Стоимостная структура минерально-сырьевого потенциала Республики Коми:

а – общая стоимость; *б* – стоимость промышленных запасов

Figure 1. The cost structure of the mineral resource potential of the Komi Republic: a – total cost; b – the cost of industrial reserves

доходах, налог на имущество минерально-сырьевого комплекса составляет пятую часть от республиканских сборов имущественного налога и в три раза меньше аналогичного налога, уплаченного предприятиями торговли.

Этот дисбаланс проявляется еще более ярко при сопоставлении с оценками потенциальной стоимости минерального сырья в недрах республики. Оценка стоимости ресурсного потенциала Республики Коми основывалась на методических подходах, изложенных в работах [15–17]. Для ранжирования месторождений и проявлений полезных ископаемых Республики Коми по степени их инвестиционной привлекательности использовались методики [18, 19]. Общая стоимость перспективного минерально-сырьевого потенциала Республики Коми с учетом цен мирового рынка, данных статистической отчетности и торговых площадок составила более 11 трлн руб. На рис. 1 показана стоимостная структура минерального сырья региона.

В общей стоимости минерально-сырьевого потенциала региона ресурсов две трети приходится на нефтегазовые ресурсы и каменный уголь, довольно высока доля известняков и доломитов – почти 12 % стоимости, на остальные полезные ископаемые региона, включая золото, редкие земли, руды черных и цветных металлов, приходится только 5,5 % общей стоимости. В структуре запасов углеводородное сырье составляет больше половины, доля угля и горючих сланцев занимает 40 %, доля прочих полезных ископаемых не превышает 3 % общей стоимости. Сложившаяся структура объясняется высокими ценами и благоприятной внешней конъюнктурой на рынке углеводородного сырья, а также значительными ресурсами каменного угля и низкой степенью разведанности других видов сырья.

Сопоставляя основные макроэкономические показатели Республики Коми и данные стоимостной оценки, нужно отметить, что валовой региональный продукт составляет 8,9 % от потенциальной стоимости полезных ископаемых в недрах, а активные запасы минерально-сырьевых объектов республики сопоставимы с основными фондами республики и превосходят

их в 1,6 раза. Как отмечалось ранее, в экономически развитых горнодобывающих странах на минеральное сырье приходится незначительная доля национального богатства. Как правило, стоимость недр составляет первые проценты стоимости основного капитала и произведенных активов. Например, экономическая рента в Канаде от добычи сырой нефти и природного газа оценивалась примерно в 20 млрд долл. США, что составило 8 % ВВП [20], в Австралии стоимость недр составляет одну десятую стоимости основного капитала, стоимость запасов полезных ископаемых составляет от 3 до 7 % стоимости произведенных активов в США.

Уровень платежей минерально-сырьевых отраслей в сопоставлении с потенциальной стоимостью экономически активных запасов приведен в табл. 3.

Согласно выполненным расчетам, рентными платежами ежегодно изымается от 1,2 до 4 % стоимости экономически активных запасов. Если принять во внимание весь объем налогов и сборов, поступивших от минерально-сырьевых отраслей, эта доля возрастает до 5 %. Стоит отметить почти двукратный рост доли ресурсных платежей от потенциальной стоимости сырья в недрах за последние 5 лет (за исключением 2020 г.).

Один из методов оценки минерально-сырьевых активов основан на предположении, что в результате тщательно продуманного налогового законодательства вся сверхприбыль горной компании будет изыматься. В этом случае стоимость актива добывающей компании будет равна нулю, а стоимость ресурса передана владельцу роялти. Таким образом, стоимость минерального ресурса будет равна сумме выплаченных роялти и доходу добывающей компании [21]. Однако такой подход маловероятен в силу несовершенной системы платежей. Вместе с тем в Нидерландах стоимость газа в Северном море оценивается именно таким методом. Голландцы оценивают ресурсную ренту непосредственно налоговыми поступлениями. Правительства Великобритании, Норвегии, Нидерландов в этом регионе пытаются изъять большую часть ренты за ресурсы посредством роялти и налогов, забирая при этом более 80 % от стоимости аренды ресурсов. В Норвегии Законом «О налогообложении подводных нефтегазовых месторождений» дополнительно сверх подоходного на-

Таблица 3. Уровень налоговых поступлений горнодобывающих предприятий региона относительно стоимости экономически активных запасов, %**Table 3. The level of tax revenues of mining enterprises in the region relative to the value of economically active reserves, %**

Уровень налоговых поступлений	Год				
	2017	2018	2019	2020	2021
Доля общего объема налоговых платежей минерально-сырьевого сектора относительно:					
общей стоимости экономически активных запасов	1,5	2,3	2,3	1,6	4,8
стоимости экономически активных запасов угля, нефти и газа	1,7	2,6	2,6	1,8	5,5
Доля рентных платежей минерально-сырьевого сектора относительно:					
общей стоимости экономически активных запасов	1,2	1,9	2,0	1,2	3,8
стоимости экономически активных запасов угля, нефти и газа	1,4	2,2	2,2	1,3	4,3

лога был введен специальный налог в связи с высокой рентабельностью нефтегазовой деятельности в размере 50 % [22, 23].

Минерально-сырьевые ресурсы Республики Коми обладают высоким стоимостным потенциалом, значение сырьевых отраслей для экономики региона и страны трудно переоценить – именно здесь формируется большая часть доходов консолидированных бюджетов, вместе с тем на территории республики остается только 1/10 налогов и платежей, полученных от разработки, переработки и транспортировки полезных ископаемых. Отметим, что некоторые ресурсные страны придерживаются иной стратегии, в частности, в Бразилии основная часть налогов остается в распоряжении тех штатов и муниципалитетов, на территории которых находятся месторождения полезных ископаемых [13], необходимо также отметить опыт Китая при распределении доходов, полученных от разработки минерального сырья – в центральный бюджет поступают рентные платежи, формируемые на нефтяных и газовых месторождениях, расположенных в пределах морской акватории страны,

остальные ресурсные платежи приходятся на бюджеты тех территорий, на которых расположены месторождения полезных ископаемых [25].

Выводы

В связи со сложившейся в России системой распределения бюджетных доходов в сфере недропользования необходимо уделять большее внимание развитию инфраструктурных и социальных объектов при согласовании лицензионных соглашений, а также созданию благоприятных условий для освоения месторождений общераспространенных полезных ископаемых, так как именно они служат развитию экономики региона. Ресурсными платежами ежегодно изымается от 1,5 до 4 % стоимости экономически активных запасов. Квалифицировать полученные данные довольно сложно, так как оценки стоимости сырья носят вероятностный характер и не учитывают риски и особенности разработки конкретных месторождений, но как показатели эффективности освоения минеральных ресурсов подобные показатели могут быть использованы при разработке программ развития сырьевого потенциала как отдельного региона, так и страны в целом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Fiscal Regimes for Extractive Industries – Design and Implementation: policy papers; prepared by the Fiscal Affairs Department; approved by Carlo Cottarelli. Washington, D. C.: International Monetary Fund, 2012. August 15. 81 p.
2. Hogan L. International Mineral Taxation: experience and issues // Taxing natural resources: new challenges, new perspectives (Washington, D. C.: International Monetary Fund, 2008, 25–27 September). P. 1–27. URL: <https://webarchive.nla.gov.au/awa/20081015213850/http://pandora.nla.gov.au/pan/30281/20081010-0001/cp08.11.pdf>
3. Garnaut R., Clunies Ross A. Taxation of Mineral Rents. Oxford: Clarendon Press, 1983. 350 p.
4. Otto J., Batarseh M., Cordes J. Global Mining Taxation Comparative Study. Golden, Colorado, U.S.: Colorado School of Mines, Institute for Global Resources Policy and Management, 2000. 214 p.
5. Baunsgaard T. A Primer on Mineral Taxation: IMF Working Paper. Washington, D. C.: International Monetary Fund, 2001. 35 p. URL: <https://www.imf.org/external/pubs/ft/wp/2001/wp01139.pdf>
6. The Taxation of Petroleum and Minerals. Principles, problems and practice / ed. by Daniel F., Keen M., McPherson C. London: Routledge, 2010. 480 p. <https://doi.org/10.4324/9780203851081>
7. Крюков В. А., Токарев А. Н. Нефтегазовые ресурсы в трансформируемой экономике: о соотношении реализованной и потенциальной общественной ценности недр (теория, практика, анализ и оценки). Новосибирск: Наука-Центр, 2007. 588 с.
8. Бобылев Ю. Н., Турунцева М. Ю. Налогообложение минерально-сырьевого сектора экономики. М.: Ин-т эконом. политики им. Е. Т. Гайдара, 2010. 200 с.
9. Бобылев Ю. Н. Мировой опыт налогообложения добывающей промышленности. М., 2013. 67 с.
10. Lund D. Rent Taxation for Nonrenewable Resources // Annual Review of Resource Economics. 2009. Vol. 1. P. 287–308. <https://doi.org/10.1146/annurev.resource.050708.144216>
11. Gaudet G., Lassere P., Long N. V. Optimal Resource Royalties with Unknown and Temporally Independent Extraction Cost Structures // International Economic Review. 1995. Vol. 36. P. 715–749.
12. United Nations Handbook on Selected Issues for Taxation of the Extractive Industries by Developing Countries. N. Y.: United Nations, 2017. 477 p.
13. Моисеева М. А., Войшвилло И. Е., Милоголов Н. С. Налогообложение добычи нефти и газа: тенденции развития // Финансовый журнал. 2012. №1. С. 87–100.

14. Карцева И. С., Конвисарова Е. В. Современное налогообложение в Китае и пути его совершенствования в отдельных аспектах // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2016. № 7. С. 635–638.
15. Неженский И. А., Павлова И. Г. Методические основы оценки стоимости российских недр // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 1995. № 4. С. 13–18.
16. Богатство недр России. Минерально-сырьевой и стоимостный анализ / науч. ред. Б. К. Михайлов, О. В. Петров, С. А. Кимельман. 3-е изд., доп. СПб: Изд-во ВСЕГЕИ, 2008. 484 с.
17. Бурцева И. Г., Тихонова Т. В., Бурцев И. Н. Экономическая оценка минерально-сырьевого потенциала арктических территорий Республики Коми // Арктика: экология и экономика. 2022. Т. 12. № 1. С. 87–98. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2022-1-87-98>
18. Кривоносов Л. А., Головин А. А., Гуляева Н. Г., Трефилова Н. Я. Оценка инвестиционной привлекательности территорий, перспективных для горнорудного освоения // Разведка и охрана недр. 2004. № 11. С. 8–15.
19. Ягольницер М. А. Сравнительная экономическая оценка месторождений полезных ископаемых региона // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2004. № 4. С. 35–39.
20. Heaps T., Helliwell J. F. The taxation of natural resources // Handbook of public economics. Vol. I / ed. by A. J. Auerbach and M. Feldstein. Amsterdam, North Holland: Elsevier Science Publisher BV, 1985. Chapter 8. P. 421–472.
21. Davis G. A. Economic Methods of Valuing Mineral Assets // ASA/CICBV 5th Joint Business Valuation Conference, Orlando, Florida, October 24–26, 2002. Golden: Colorado School of Mines, 2002.
22. Андреев А. Осторожный фискальный оптимизм // Нефть России. 2011. № 2. С. 14–26.
23. Deloitte. Oil and gas taxation in Norway. 2014. URL: <http://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/global/Documents/Energy-and-Resources/gx-er-oil-and-gas-taxguide-norway.pdf>
24. Куклина Е. А. Ресурсные налоги в экономике современного Китая // Финансовый журнал. 2015. № 2 (24). С. 89–97.

Статья поступила в редакцию 31 октября 2022 года

Impact of mining enterprises on tax revenues of the budget of the Republic of Komi

Irina Grigor'evna BURTSEVA*
Evgeniy Nikolaevich TIMUSHEV**

Institute of Social, Economic and Energy Problems of the North, Komi Scientific Center of the Ural Branch of RAS, Syktyvkar, Komi Republic, Russia

Abstract

Relevance. The problems of the withdrawal of natural resource rent in the development of mineral deposits have been relevant throughout the history of the development of natural resources, and they are of particular importance at the present stage, when the demand for a fair distribution of income comes to the fore in the economic and political development of society. The task of determining a reasonable economic assessment of mineral raw materials is one of the most difficult to solve in the field of environmental economics due to the huge variety of mineral deposits that are difficult to unify, price volatility, differentiated economic conditions for development, etc.

The purpose of the research – determination of the degree of withdrawal of the potential value of mineral raw materials in the bowels through tax revenues generated by the mining enterprises of the republic.

Research methodology. During the research, methods of economic and statistical analysis, economic and geographical analysis were used, monographic, abstract-logical, analytical, systematic approaches were used.

Results. In the course of the study, a cost estimate was made of the mineral resource potential of the Komi Republic, which was based on the methodological recommendations of the Russian Geological Research Institute named after A. P. Karpinsky (VSEGEI), experts in the field of mineral raw material evaluation and the author's methodology. The analysis of the main approaches of tax policy in the world practice was carried out, which, with all the existing differences between countries, testifies to the main goal of the fiscal policy of taxation of the mining industries – the maximum withdrawal of profits while maintaining the interest of entrepreneurs in continuing the high-risk mining business. The paper considered tax revenues generated in the extractive sector of the region's economy, which were compared with the main macroeconomic indicators of the Komi Republic and the Russian Federation, as well as the results of the valuation of the mineral resource potential.


Conclusion. As a result of the study, the dual role of taxation of the mining industry is shown – the vast majority of tax revenues are generated in the mineral resource sector, but the existing budget rules lead to the fact that at the regional level their role is significantly reduced. This should serve as an incentive to expand the opportunities for the development of deposits of local raw materials, the income from the development of which serves as a source of replenishment of the regional budget.

Keywords: resource rent, mineral resources, economic evaluation, region, Komi Republic, taxes, tax policy, mining industry, mining enterprises, mineral deposits.

REFERENCES

1. Fiscal Regimes for Extractive Industries – Design and Implementation: policy papers; prepared by the Fiscal Affairs Department; approved by Carlo Cottarelli. Washington, D. C., 2012, 81 p.
2. Hogan L. 2008, International Mineral Taxation: experience and issues. Taxing natural resources: new challenges, new perspectives. Washington, D. C., pp. 1–27. URL: <https://webarchive.nla.gov.au/awa/20081015213850/http://pandora.nla.gov.au/pan/30281/20081010-0001/cp08.11.pdf>
3. Garnaut R., Clunies Ross A. 1983, Taxation of Mineral Rents. Oxford, 350 p.
4. Otto J., Batarseh M., Cordes J. 2000, Global Mining Taxation Comparative Study. Golden, Colorado, U.S., 214 p.
5. Baunsgaard T. 2001, A Primer on Mineral Taxation: IMF Working Paper. Washington, D. C., 35 p. URL: <https://www.imf.org/external/pubs/ft/wp/2001/wp01139.pdf>
6. Daniel F., Keen M., McPherson C. 2010, The Taxation of Petroleum and Minerals. Principles, problems and practice. London, 480 p. <https://doi.org/10.4324/9780203851081>
7. Kryukov V. A., Tokarev A. N. 2007, Oil and gas resources in a transforming economy: on the ratio of the realized and potential social value of the subsoil (theory, practice, analysis and assessments). Novosibirsk, 588 p. (In Russ.)
8. Bobylev Yu. N., Turuntseva M. Yu. 2010, Taxation of the mineral resource sector of the economy. Moscow, 200 p. (In Russ.)
9. Bobylev Yu. N. 2013, World experience in taxation of the extractive industry. Moscow, 67 p. (In Russ.)
10. Lund D. 2009, Rent Taxation for Nonrenewable Resources. *Annual Review of Resource Economics*, vol. 1, pp. 287–308. <https://doi.org/10.1146/annurev.resource.050708.144216>

✉ burtseva@iespn.komisc.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-8941-6587>

**timushev@iespn.komisc.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-5220-3841>

11. Gaudet G., Lassere P., Long N. V. 1995, Optimal Resource Royalties with Unknown and Temporally Independent Extraction Cost Structures. *International Economic Review*, vol. 36, pp. 715–749.
12. United Nations Handbook on Selected Issues for Taxation of the Extractive Industries by Developing Countries. N. Y., 2017, 477 p.
13. Moiseeva M. A., Voishvillo I. E., Milogolov N. S. 2012, Taxation of oil and gas production: development trends // *Finansovyy zhurnal* [Financial journal], no.1, pp. 87–100. (In Russ.)
14. Kartseva I. S., Konvisarova E. V. 2016, Current taxation in China and ways of its improvement in some aspects. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy* [International Journal of Applied and Basic Research], no. 7, pp. 635–638. (In Russ.)
15. Nezhensky I. A., Pavlova I. G. 1995, Methodological bases for assessing the cost of Russian subsoil. *Mineral'nyye resursy Rossii. Ekonomika i upravleniye* [Mineral Resources of Russia. Economics and Management], no. 4, pp.13–18. (In Russ.)
16. B. K. Mikhailov, O. V. Petrov, S. A. Kimelman. 2008, The richness of the subsoil of Russia. Mineral resource and cost analysis. Saint Petersburg, 484 p. (In Russ.)
17. Burtseva I. G., Tikhonova T. V., Burtsev I. N. 2022, Economic assessment of mineral resource potential of the Komi republic arctic territories. *Arktika: ekologiya i ekonomika* [Arctic: ecology and economy], vol. 12, no. 1, pp. 87–98. (In Russ.) <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2022-1-87-98>
18. Krinochkin L. A., Golovin A. A., Gulyaeva N. G., Trefilova N. Ya. 2004, Assessment of investment attractiveness of territories promising for mining development. *Razvedka i okhrana nedr* [Exploration and protection of mineral resources], no. 11, pp. 8–15. (In Russ.)
19. Yagolnitser M. A. 2004, Comparative economic evaluation of mineral deposits in the region. *Mineral'nyye resursy Rossii. Ekonomika i upravleniye* [Mineral Resources of Russia. Economics and Management], no. 4, pp. 35–39. (In Russ.)
20. Heaps T., Helliwell J. F. 1985, The taxation of natural resources. *Handbook of public economics*, vol. 1 / ed. by A. J. Auerbach and M. Feldstein. Amsterdam, North Holland, Chapter 8, pp. 421–472.
21. Davis G. A. 2002, Economic Methods of Valuing Mineral Assets. ASA/CICBV 5th Joint Business Valuation Conference, Orlando, Florida, October 24–26, 2002. Golden.
22. Andreev A. 2011, Cautious fiscal optimism. *Neft' Rossii* [Russian oil], no. 2, pp. 14–26. (In Russ.)
23. Deloitte. Oil and gas taxation in Norway. 2014. URL: <http://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/global/Documents/Energy-and-Resources/gx-er-oil-and-gas-taxguide-norway.pdf>
24. Kuklina Ye. A. 2015, Resource taxes in the economy of modern China. *Finansovyy zhurnal* [Financial journal], no. 2 (24), pp. 89–97. (In Russ.)

The article was received on October 31, 2021

Технико-экономическое сравнение вариантов разработки сложноструктурных пластов Эльгинского месторождения

Доржо Владимирович ХОСОЕВ*

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

Аннотация

Актуальность. В условия Севера при хроническом дефиците материальных и энергетических ресурсов при добыче полезных ископаемых вопросы поиска оптимальных технико-экономических и экологических показателей являются актуальной и насущной проблемой.

Цель работы – показать эффективность применения комбайнов КСМ-2000Р при разработке угольных пластов сложного строения Эльгинского месторождения.

Методы исследования. Используются статистические методы обработки информации, методы сравнения, аналогий, логический анализ, метод экспертных оценок.

Результаты. Анализ проведенных расчетов показал, что при первом варианте с цикличной технологией структура по элементам затрат составила: 34,8 % – на электроэнергию, 33,2 % – на амортизацию, 28,3 % – на материалы и 3,7 % – на оплату труда. В варианте с использованием комбайнов типа КСМ-2000Р максимальные показатели затрат: 36,7 % – на амортизацию, 29,7 % – на электроэнергию, 27,9 % – на материалы и 5,5 % – на оплату труда. Расчеты показали, что при использовании комбайнов затраты на добычу 1 т угля снизились по всем элементам более чем на 27 % по сравнению с цикличной технологией. Также списочная численность рабочих снизилась на 6 и составила 30 человек. Кроме того, увеличилась среднемесячная производительность труда рабочего в бригаде и составила 4046 т/мес.

Выводы. Выполнены технико-экономические расчеты, на основании которых показано, что применение комбайнов КСМ-2000Р достаточно эффективно при разработке угольных пластов сложного строения. Условная годовая экономия составила 57 248 тыс. руб. с вариантом безвзрывной технологии по сравнению с вариантом с цикличной технологией. Чистый дисконтированный доход (ЧДД) за девять лет при использовании комбайнов типа КСМ-2000Р составил 6296 млн руб. С экологической точки зрения, применение безвзрывной технологии на базе комбайнов КСМ с автосамосвалами и конвейерным транспортом на добычных работах в 1,5 раза уменьшит негативное воздействие на окружающую среду по сравнению с цикличной технологией. При этом частичное применение КСМ на вскрышных работах позволит еще больше снизить негативное воздействие – до 1,7 раза.

Ключевые слова: цикличная технология, горный комбайн, безвзрывная технология, угольный пласт, экономическая эффективность, материалы, амортизация, себестоимость.

Введение

Эльгинское месторождение находится на юге Якутии, в Токинском угольном районе Южно-Якутского бассейна. Общая площадь его составляет 236 км². Ближайшими к месторождению населенными пунктами являются пос. Чульман, расположенный в 415 км по прямой к западу, и пос. Чагда – в 350 км к северу. Восточная ветвь БАМа проходит в 320 км в южном направлении от месторождения за Становым хребтом. В данное время Эльгинское месторождение разрабатывается с использованием традиционной цикличной технологии на базе одноковшовых экскаваторов, буровзрывных работ и автотранспорта.

При разработке таких месторождений большое значение уделяется экологической составляющей производства горных работ, особенно в условиях Севера [1–3]. Это касается и рассматриваемого месторождения, с учетом, что оно находится в местности, где расположены два объекта, отнесенные к государственным заказникам: оз.

Большое Токко и селение представителей коренных малочисленных народов Крайнего Севера в верховьях р. Алгамы. В этих заказниках находятся уникальные места со своеобразным растительным и животным миром, которые из-за сложной доступности до настоящего времени сохраняются почти в первозданном виде, что предъявляет повышенные экологические требования на всех этапах эксплуатации месторождения. Поэтому достаточно актуальным является рассмотрение новых технологических решений разработки этого месторождения в части применения технологий и оборудования. Весьма важными являются также вопросы чистоты и полноты выемки полезных ископаемых из недр.

Перспективным в плане селективной разработки сложноструктурных пластов Эльгинского месторождения является применение безвзрывной технологии на базе комбайнов КСМ-2000Р. При одной и той же расчет-

✉ hosoev70@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-1466-8509>

ной производительности масса комбайнов типа КСМ меньше экскаватора ЭКГ в 4–6 раз, а усилие резания в 5–6 раз выше, чем у роторного экскаватора. Благодаря высоким значениям развиваемых усилий резания, эти машины могут успешно разрабатывать породы прочностью на сжатие до 60–80 МПа без использования буровзрывных работ [4–6]. Опыт эксплуатации и исследования показал, что рассматриваемое оборудование способно селективно вынимать слои от 10–20 см и выше. Точность резания материала достигает 10 см [7].

При селективной разработке сложноструктурных пластов с использованием горных комбайнов основной объем потерь угля наблюдается при отработке приконтактных зон угля с породой, а также за счет включения маломощных угольных пачек во внутреннюю вскрышу. При этом наиболее благоприятные условия селективной выемки с минимальными потерями реализуются, когда угол падения пластов не превышает конструктивно допустимого уклона (для КСМ-2000Р эта величина составляет не более 5–6 град) [8]. При увеличении углов падения пластов потери или разубоживание угля возрастают, особенно в диапазоне от 5 до 20 град [9]. Причем эти потери зависят от высоты обрабатываемого слоя: чем она меньше, тем меньше потери. В условиях Эльгинского месторождения пласты угля в основном имеют пологое залегание от 2 до 5 град, оптимальное для применения комбайнов КСМ-2000Р. Для оценки эффективности применения данного оборудования на Эльгинском месторождении необходимо выполнить технико-экономические расчеты в сравнении с цикличной технологией.

В работе [10] на примере угольного пласта H_{15} и вмещающих пород междупластья H_{16} – H_{15} для оценки горнотехнических условий с позиции применения такого оборудования был рассмотрен «первоочередной участок отработки» в пределах западного участка месторождения (рис. 1). Выполнен анализ по структурным признакам, мощности, условиям залегания междупластий и угольных пластов, а также по прочностным свойствам пород в массиве.

Первоочередной участок располагается в северо-западной части месторождения, имеет длину около 3 км и ширину 550 м. Запасы по пласту H_{15} и отщепленному от него H_{15}^B составляли 17,6 млн т угля.

Как показал проведенный анализ, угольные пласты имеют пологое залегание около 4 град. Из двух угольных пластов H_{15}^B и H_{15} угольный пласт H_{15}^B имеет выдержанный характер и простое строение. Этот пласт следует отрабатывать валовым способом, а угольный пласт H_{15} на данном участке характеризуется по мощности невыдержанностью и сложным строением. Таким образом, данный пласт следует отрабатывать селективным способом.

В ИГД Севера СО РАН проведена оценка эффективности селективной разработки с использованием комбайнов типа КСМ-2000Р на примере отработки угольных пластов H_{15}^B и H_{15} первоочередного участка Эльгинского каменноугольного месторождения [11]. С использованием горно-геологической информационной системы Mine Frame [12, 13] выполнены расчеты потерь, разубоживания и зольности угля для угольных пластов H_{15}^B и H_{15} по трем вариантам их разработки. Установлено, что при селективной разработке сложноструктурных угольных пластов H_{15}^B и H_{15} комбайнами КСМ-2000Р в зависимости от параметров вынимаемого слоя разубоживание угля снизится в 1,8–6,5 раза, а зольность угля уменьшится на 1,3–2,5 % по сравнению с валовой разработкой. При этом потери при разработке сложноструктурных пластов с большим количеством породных прослоев незначительно увеличатся, а при разработке угольных пластов простого строения потери значительно уменьшатся.

Результаты

Для экономического сравнения были выбраны два технологических варианта для отработки междупластий H_{16} – H_{15}^B , H_{15}^B – H_{15} и угольных пластов H_{15}^B и H_{15} на первоочередном участке Эльгинского месторождения. Срок отработки 9 лет, режим работы разреза 365 дней, 2 смены продолжительностью 12 ч.

Первый вариант – междупластья H_{16} – H_{15}^B и H_{15}^B – H_{15} отрабатываются по простой бестранспортной схеме экска-

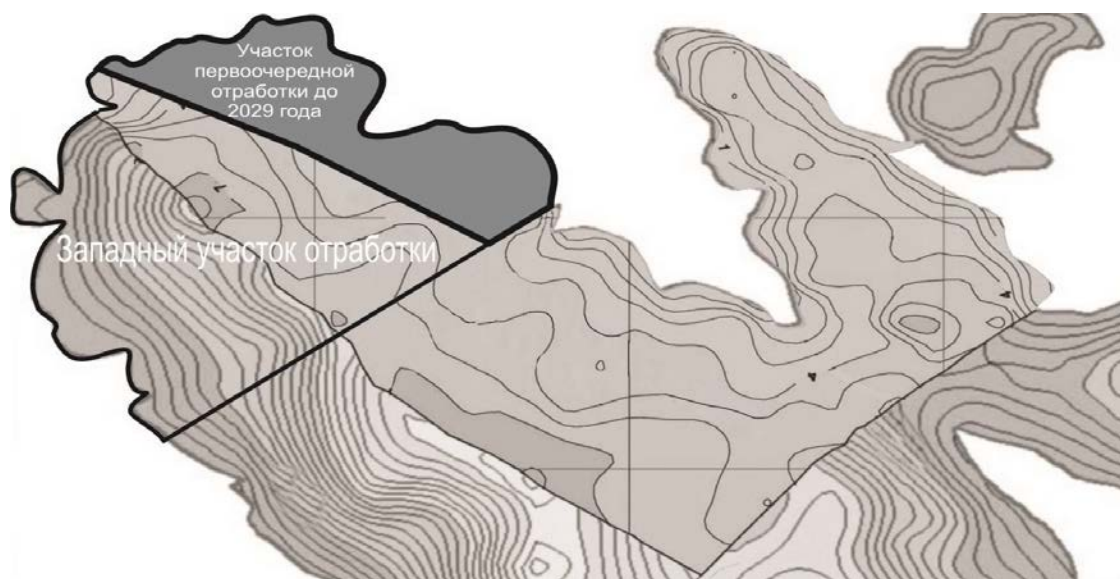


Рисунок 1. Месторасположение первоочередного участка отработки
Figure 1. Location of the priority mining site

Таблица 1. Комплект оборудования при разработке первоочередного участка Эльгинского месторождения**Table 1. Set of equipment for the development of the priority area of the Elginskoye field**

Оборудование	При циклической разработке, шт.
<i>Вскрыша</i>	
Экскаваторы ЭШ-20/90	2
Буровые станки СБШ-160	1
Бульдозеры D-275A	1
<i>Добыча</i>	
Экскаваторы РС-2000	1
Экскаваторы РС-1250	1
Автомобили БелАЗ-7555	6
Буровые станки СБШ-160	1
Оборудование	При безвзрывной разработке, шт.
<i>Вскрыша и добыча</i>	
Экскаваторы КСМ-2000Р	2
Автомобили БелАЗ-7530	8
Бульдозеры D-275A	1

Таблица 3. Калькуляция себестоимости добычи 1 т угля и ее структура**Table 3. Calculation of the cost of production of 1 ton of coal and its structure**

Элементы затрат	Всего, тыс. руб.	На 1 т угля, руб.	Структура, %
Оплата труда	27 324,0	20,8	3,7
Материалы	214 509,9	163,7	28,3
Амортизация	251 469,0	192,0	33,2
Электроэнергия	263 613,4	201,3	34,8
<i>Итого</i>	<i>756 916,3</i>	<i>577,8</i>	<i>100,0</i>

ваторами-драглайнами ЭШ-20/90 с размещением вскрышных пород в выработанном пространстве. Добычные работы осуществляются по транспортной схеме дизель-гидравлическими экскаваторами РС-2000 и РС-1250 с погрузкой в автосамосвалы БелАЗ-7555 грузоподъемностью 55 т. Бурение взрывных скважин при подготовке вскрышных пород и угольных пластов к выемке осуществляется станками шарошечного бурения СБШ-160. Для выполнения вспомогательных операций на горных работах задействованы бульдозеры-рыхлители D-275A (D-9R). Результаты расчетов количества оборудования приведены в табл. 1.

Второй вариант – на вскрышных и добычных работах используются горные комбайны КСМ-2000Р с автосамосвалами БелАЗ-7530, бульдозеры-рыхлители D-275A (D-9R), табл. 1.

По методикам произведена оценка экономической эффективности этих вариантов. Использовались данные из проекта ТЭО Сиваглинского ГОКа [14], где в качестве средних значений уровня заработной платы приняты данные, близкие к фактическим значениям ХК ОАО «Якутуголь» – за основу взяты значения проекта отработки запасов шахты «Джебарики-Хая» открытым способом и уровня зарплат на Эльгинском угольном комплексе (филиал ХК ОАО «Якутуголь»). Далее приведен расчет экономического эффекта на первоочередном участке Эльгинско-

Таблица 2. Исходные данные отработки первоочередного участка**Table 2. Initial data for the development of the priority site**

Показатель	Значение
Мощность пласта, м	5,8
Плотность угля, т/м ³	1,4
Годовая производственная мощность участка, т/г	1 488 000
Объемы угля, пласт Н ₁₅ ^а , тыс. т	1 107 000
Объемы угля, пласт Н ₁₅ ^б , тыс. т	381 000
Коэффициент вскрыши	3,41
Потери угля, пласт Н ₁₅ ^а , %	19,97
Потери угля, пласт Н ₁₅ ^б , %	9,24
Режим работы участка в сутки, смена	2 по 12
Предельный режим работы участка	Непрерывный
Суточный режим работы одного работника, ч	12

Таблица 4. Технико-экономические показатели участка**Table 4. Technical and economic indicators of the site**

Показатель	Значение
	1-й вариант
Годовая добыча, т	1 309 628
Затраты на добычу 1 т всего, руб., в том числе по элементам:	577,8
оплата труда	20,8
материалы	163,7
амортизация	192,0
электроэнергия	201,3
Списочная численность участка всего, чел.	42
В том числе рабочие,	36
из них: комплексная бригада ИТР	6
Производительность труда рабочего, т/мес.	3064

го месторождения для циклической технологии. Исходные данные для расчета экономической эффективности работ первоочередного участка представлены в табл. 2.

Себестоимость 1 т угля ($C_{1т}$, руб.) определяется по каждому элементу как частное деление суммы затрат по данному элементу на месячный объем горной массы и сводится в табл. 3.

Анализ показал, что в структуре по элементам затрат наибольшая статья составила по электроэнергии – 34,8 %, затем 33,2 % по амортизации, 28,3 % по материалам и 3,7 % по оплате труда (табл. 4).

Списочная численность рабочих для базового варианта составила 36 чел. Производительность рабочего участка по базовому варианту составила 3064 т/мес.

Такой же расчет произведен для безвзрывной технологии на базе комбайнов типа КСМ-2000Р. Исходные данные для расчета экономической эффективности работ комбайнов на первоочередном участке представлены в табл. 5.

Себестоимость 1 т угля ($C_{1т}$, руб.) определяется по каждому элементу как частное от деления суммы затрат по данному элементу на месячный объем горной массы и сводится в табл. 6.

В этом варианте с безвзрывной технологией структура по элементам затрат выглядит следующим об-

Таблица 5. Исходные данные отработки первоочередного участка
Table 5. Initial data for the development of the priority site

Показатель	Значение
Мощность пласта, м	5,8
Плотность угля, т/м ³	1,4
Годовая производственная мощность участка, т/г	1 488 000
Объемы угля, пласт Н ₁₅ ^а , тыс. т	1 107 000
Объемы угля, пласт Н ₁₅ ^б , тыс. т	381 000
Коэффициент вскрыши	3,41
Потери угля, пласт Н ₁₅ ^а , %	10,38
Потери угля, пласт Н ₁₅ ^б , %	7,42
Режим работы участка в сутки, смена	2 по 12
Предельный режим работы участка	Непрерывный
Суточный режим работы одного работника, ч	12

Таблица 7. Техничко-экономические показатели участка
Table 7. Technical and economic indicators of the site

Показатель	Значение	
	1-й вариант	2-й вариант
Годовая добыча, т	1 309 628	1 366 312
Затраты на добычу 1 т всего, руб., в том числе по элементам:		
оплата труда	577,8	535,9
материалы	20,8	25,1
амортизация	163,7	190,7
электроэнергия	192,0	177,5
электрoэнергия	201,3	142,6
Списочная численность участка всего, чел.	42	36
В том числе рабочие, из них:		
комплексная бригада	36	30
ИТР	6	6
Производительность труда рабочего, т/мес	3064	4060

разом: максимальные показатели достигли 36,7 % на амортизацию, затем 29,7 % на электроэнергию, далее 27,9 % на материалы и соответственно 5,5 % на оплату труда (табл. 7).

Условная годовая экономия (Э_г, руб.) определяется как разность между себестоимостью 1 т угля первого варианта (С_{1в}, руб.) и второго варианта (С_{2в}, руб.), умноженной на годовой объем добычи (Q_г, т).

$$Э_g = (C_{1в} - C_{2в}) Q_g = (577,8 - 535,9) \times 1\,366\,312 = 57\,248\,472 \text{ руб.}$$

Результаты расчета показали, что затраты на добычу 1 т угля снизились по всем элементам более чем на 27 %. Списочная численность рабочих снизилась на 6 и составила 30 человек. Среднемесячная производительность труда рабочего в бригаде увеличилась и составила 4046 т/мес. Условная годовая экономия составила 57 248 тыс. руб.

В качестве показателя, используемого для оценки эффективности мероприятий, принят чистый дисконтированный доход. Чистый дисконтированный доход (ЧДД) – это накопленный дисконтированный эффект за расчетный период. Он характеризует превышение суммарных денежных поступлений над суммарными затратами для данного мероприятия с учетом факто-

Таблица 6. Калькуляция себестоимости добычи 1 т угля и ее структура
Table 6. Calculation of the cost of production of 1 ton of coal and its structure

Элементы затрат	Всего, тыс. руб.	На 1 т угля, руб.	Структура, %
Оплата труда	34 382	25,1	5,5
Материалы	260 625	190,7	27,9
Амортизация	243 559	177,5	36,9
Электроэнергия	194 118	142,6	29,7
<i>Итого</i>	655 684	535,9	100,0

Таблица 8. Исходные данные
Table 8. Initial data

Показатель	Уголь
1. Объемы добываемого полезного ископаемого всего, тыс. т	12 092
3. Цена полезного ископаемого, руб./т	3500

ра времени. Мероприятие является эффективным при положительном чистом дисконтированном доходе, т. е. при ЧДД > 0. При сравнении альтернативных вариантов предпочтение отдается тому, который имеет большее значение ЧДД.

Расчет чистого дисконтированного дохода

I вариант – цикличная технология

Исходные данные для расчетов приведены в табл. 8.

Результаты расчетов сведены в табл. 9.

Показатель экономической эффективности инвестиционных затрат: чистый дисконтированный доход (ЧДД) за десять лет при использовании цикличной технологии составил 3731,0 млн руб.

II вариант – безвзрывная технология

Исходные данные для расчетов приведены в табл. 10.

Результаты расчетов сведены в табл. 11.

Чистый дисконтированный доход (ЧДД) за десять лет при использовании безвзрывной технологии на базе комбайнов типа КСМ-2000Р составил 6296 млн руб., т. е. он больше, чем в первом варианте.

Ранее в работе [15] с учетом технико-экономических и экологических требований было рассмотрено три технологических варианта разработки Эльгинского месторождения. Для всех вариантов рассчитано требуемое количество оборудования для объема добычи 30 млн т угля и 108 млн м³ вскрыши в год исходя из K_{вск} – 3,6 м³/т [16]. Первый вариант – цикличная технология с применением БВР на вскрышных и добычных работах. Оборудование на вскрышных работах – экскаваторы ЭКГ-1500К производства ОМЗ с объемом ковша 40 м³, автосамосвалы БелАЗ – 7501 (280 т). Буровые станки СБШ-250 МНА-32. Выбор такой высокопроизводительной техники объясняется большой мощностью вскрыши (междупластий) от 14 до 68 м и значительным объемом горных работ. На добычных работах – экскаваторы ЭКГ-10 с емкостью ковша 10 м³, позволяющие производить лучшую селекцию при выемке тонких угольных пластов. Доставка угля с верхних горизонтов до промышленной площадки 130-тонными автосамосвалами БелАЗ-75131, буровые станки СБШ-160. На нижних горизонтах, где фронт работ более

Таблица 9. Определение экономической эффективности инвестиций
Table 9. Determination of the economic efficiency of investments

Показатель	Годы									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1. Капитальные вложения (инвестиционные затраты), млн руб.	(2515)									
2. Доход от реализации мероприятия, млн руб.	3103	3318	3187	2996	3249	2234	2973	2658	2643	
3. Чистый денежный поток, млн руб. (п.2–п.1)	588	803	672	481	734	–281	458	143	128	
4. Коэффициент дисконтирования $Vt = (1 + e)^{-1}$ (e = 10 %)	0,909	0,826	0,751	0,683	0,620	0,564	0,513	0,466	0,424	
5. Чистая текущая дисконтированная прибыль	588	803	672	481	734	–281	458	143	128	
6. ЧДД, млн руб.					3731					

Таблица 10. Исходные данные
Table 10. Initial data

Показатель	Уголь
1. Объемы добываемого полезного ископаемого всего, тыс. т	13 810
2. Количество потерь, которых можно избежать за счет применения технологии селективной выемки горными комбайнами КСМ-2000Р, тыс. т	424
3. Цена полезного ископаемого, руб./т	3500

Таблица 11. Определение экономической эффективности инвестиций
Table 11. Determination of the economic efficiency of investments

Показатель	Годы									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1. Капитальные вложения (инвестиционные затраты), млн руб.	(2436)									
2. Доход от реализации мероприятия, млн руб.	3504	3543	3442	3237	3510	2368	3109	2810	2720	
3. Чистый денежный поток, млн руб. (п.2–п.1)	1068	1107	1006	801	1074	–71	673	374	264	
4. Коэффициент дисконтирования $Vt = (1 + e)^{-1}$ (e = 10 %)	0,909	0,826	0,751	0,683	0,620	0,564	0,513	0,466	0,424	
5. Чистая текущая дисконтированная прибыль	1068	1107	1006	801	1074	–71	673	374	264	
6. ЧДД, млн руб.					6296					

протяженный (3–3,7 км) и находятся самые мощные пласты, на добычных работах рассмотрены экскаваторы ЭКГ-15ХЛ с емкостью ковша 15 м³, 220-тонные автосамосвалы БелАЗ-7530, буровые станки СБШ-160.

Второй вариант – на вскрышных работах та же циклическая технология с соответствующим набором оборудования, а на добыче – комбайны КСМ-2000Р в комплексе с автосамосвалами и конвейерами.

Третий вариант – для разработки вскрыши используются мехлопаты и частично КСМ-2000Р с автотранспортом. Как показали расчеты, до 30 % вскрышных пород Эльгинского месторождения могут разрабатываться комбайнами КСМ-2000Р, в том числе с предварительным разупрочнением с помощью ПАВ. При этом средняя производительность может составить до 1000 м³/ч. На добычных работах применяются, как и во

Таблица 12. Количество вредных выбросов
Table 12. The amount of harmful emissions

Основные технологические процессы	Масса выбросов, т/год						Сумма платы за выбросы, руб./год
	Пыль неорганическая, до 20 % SiO ₂	Углерод, окись	Азот (IV), оксид	Взвешенные вещества	Азот (II), оксид	Углерод черный, сажа	
<i>1-й вариант</i>							
БВР:							
1. По углю	540,1	39,7	57,3	353,3	–	–	42 672,7
2. По вскрыше	4103,8	840,3	929,9	2735,8	–	–	260 893,1
<i>Выемочно-погрузочные работы (ВПР)</i>							
1. По углю	325,5	–	–	217,0	–	–	132 777,7
2. По вскрыше	3260,7	–	–	2173,8	–	–	208 141,3
Транспортирование:							
1. По углю	15 522,0	802,0	2219,2	10 348,8	360,6	90,8	1 371 008,6
2. По вскрыше	13 987,0	1831,0	5720,5	9324,7	828,2	135,0	1 840 259,0
Всего:							
1. По углю	16 317,6	841,7	2276,5	10 872,1	360,6	90,8	1 546 459,0
2. По вскрыше	21 351,5	2671,3	6650,4	14 234,3	828,2	135,0	2 309 293,4
Итого	37 669,1	3513,0	8926,9	25 106,4	1188,8	225,8	3 855 752,4
<i>2-й вариант</i>							
БВР, вскрыша	4103,8	840,3	929,9	2735,8	–	–	260 893,1
ВПР:							
1. На вскрыше	3260,7	–	–	2173,8	–	–	208 141,3
2. На добыче	14,0	–	–	9,3	–	–	892,4
Транспортирование							
Автотранспорт:							
1. По углю	2683,8	141,0	392,0	1789,2	63,7	16,2	238 502,0
2. По вскрыше	13 987,0	1831,0	5720,5	9324,7	828,2	135,0	1 840 259,0
Конвейеры:							
1. По углю	1023,5	–	–	682,3	–	–	39 200,0
Всего:							
1. По углю	3721,3	141,0	392,0	2480,8	63,7	16,2	278 594,4
2. По вскрыше	21 351,5	2671,3	6650,4	14 234,3	828,2	135,0	2 309 293,4
Итого	25 072,8	2812,3	7042,4	16 715,1	891,9	151,2	2 587 887,8
<i>3-й вариант</i>							
БВР, вскрыша	2248,0	455,0	503,3	1499,0	–	–	217 556,0
ВПР:							
ЭКГ-1500К, ОМЗ, на вскрыше	2282,5	–	–	1521,6	–	–	145 697,0
КСМ-2000Р на вскрыше	15,1	–	–	10,2	–	–	969,0
КСМ-2000Р на добыче	14,0	–	–	9,3	–	–	892,4
Транспортирование							
Автотранспорт:							
1. По углю	2683,8	141,0	392,0	1789,2	63,7	16,2	238 502,0
2. По вскрыше	13 999,0	1477,6	4085,5	9332,7	663,7	114,3	1 581 609,4
Конвейеры:							
1. По углю	1023,5	–	–	682,3	–	–	39 200,0
Всего:							
1. По углю	2697,8	141,0	392,0	2480,8	63,7	16,2	278 594,4
2. По вскрыше	18 544,6	1932,6	4588,8	12 363,5	663,7	114,3	1 945 831,4
Итого	21 242,4	2073,6	4980,8	14 844,3	727,4	130,5	2 224 425,8

втором варианте, комбайны КСМ с автотранспортом и конвейерами.

С использованием программного комплекса НПО «Интеграл», «Горные работы»; «АТП-Эколог» в соответствии с «Методикой расчета вредных выбросов (сбросов) для комплекса оборудования открытых горных работ (на основе удельных показателей)» (Люберцы, 1999); «Мето-

дикой проведения инвентаризации выбросов загрязняющих веществ в атмосферу для баз дорожной техники (расчетным методом)» (М., 1998), по рассматриваемым вариантам были произведены расчеты количества вредных выбросов. Проведены расчеты платы за выбросы загрязняющих веществ в окружающую природную среду. Результаты расчетов приведены в табл. 12.

Наименьшая удельная плата за вредные выбросы составила при третьем варианте: на добыче угля – 9,3 руб./тыс. т, при разработке вскрыши соответственно – 17,9 руб./тыс. м³.

Как показывает анализ, основными источниками загрязнения атмосферы являются: автотранспорт, буровзрывные и погрузочно-разгрузочные работы. При этом максимальный объем вредных выбросов при добыче угля образуется в случае применения циклической технологии с предварительной буровзрывной подготовкой (1-й вариант). Выбросы по пыли и взвешенным веществам в первом варианте в 1,5 и 1,7 раз больше, чем во втором и соответственно третьем вариантах. Наименьшие выбросы окиси углерода – 2073 т, диоксида азота – 4981 т и оксида азота – 727 т составляют по третьему варианту, что в среднем в 1,7 раза меньше, чем при первом варианте с циклической технологией.

Таким образом, из рассмотренных технологических вариантов разработки месторождения, с экологической

точки зрения, применение безвзрывной технологии на базе комбайнов КСМ с автосамосвалами и конвейерным транспортом на добычных работах в 1,5 раза уменьшит негативное воздействие на окружающую среду по сравнению с циклической технологией. При этом частичное применение КСМ на вскрышных работах позволит еще больше снизить негативное воздействие – до 1,7 раза.

Выводы

В целом применение безвзрывной технологии на базе комбайнов КСМ для разработки Эльгинского месторождения является наиболее экономически эффективным, кроме того, она позволит минимизировать негативное воздействие на окружающую среду, в том числе уменьшить простои карьера из-за загазованности после массовых взрывов, сократить потери и повысить качество добываемого угля. Перечисленные факторы являются особенно важными с учетом территориального расположения месторождения и существующих экологических требований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пути повышения эффективности и экологической безопасности открытой добычи твердых полезных ископаемых / В. И. Ческидов [и др.]. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2010. 276 с.
2. Комплексное освоение недр: перспективы расширения минерально-сырьевой базы России / ред. К. Н. Трубецкой [и др.]. М.: ИПКОН РАН, 2009. 454 с.
3. Моделирование тепловых процессов в горном массиве при открытой разработке россыпей криолитозоны / А. С. Курилко [и др.]. Новосибирск: Академ. изд-во «Гео», 2011. 139 с.
4. Хосоев Д. В. Анализ методик расчетов производительности для комбайнов типа КСМ на Эльгинском месторождении // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2022. № 4. С. 7–16. <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2022-4-7-16>
5. Шемякин С. А., Матвеев Д. Н., Чебан А. Ю. Экономическое обоснование эффективности безвзрывной селективной выемки полезного ископаемого и вмещающих пород с использованием технико-технологических комплексов на основе фрезерных комбайнов // Горный журнал. 2015. № 2. С. 43–46. <https://doi.org/10.17580/gzh.2015.02.07>
6. Мировая горная промышленность. История. Достижения. Производство. М.: НТЦ «Горное дело», 2005. 520 с.
7. Безвзрывные технологии открытой добычи твердых полезных ископаемых / А. Р. Маттис [и др.]; отв. ред. В. Н. Опарин. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007. 336 с.
8. Краснянский Г. Л., Штейнцвайг Р. М., Рудольф В., Коваленко С. К. Опыт создания и перспективы освоения в горнодобывающей промышленности машин нового поколения КСМ-2000РМ // Уголь. 1998. № 4. С. 16–21.
9. Алешин Б. Г., Коваленко С. К., Виноцкий К. Е., Шендеров А. И., Штейнцвайг Р. М. Конструктивно-технологические особенности и перспективы применения машин типа КСМ на разрезах России // Горный вестник. 1996. № 4. С. 13–19.
10. Хосоев Д. В. Оценка горнотехнических условий Эльгинского месторождения с позиции применения горных комбайнов // Горная промышленность. 2016. № 6(130). С. 81–83.
11. Ермаков С. А., Хосоев Д. В. Оценка эффективности селективной разработки сложноструктурных угольных пластов Эльгинского месторождения // Горная промышленность. 2018. № 2(138). С. 73–74. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2018-2-138-73-74>
12. Наговицин О. В., Лукичев С. В. Горно-геологические информационные системы, область применения и особенности построения // Проблемы недропользования. 2016. № 4. С. 69–73.
13. Лукичев С. В. Цифровое прошлое, настоящее и будущее горнодобывающих предприятий // Горная промышленность. 2021. № 4. С. 73–79. <http://dx.doi.org/10.30686/1609-9192-2021-4-73-79>
14. Техничко-экономическое обоснование (ТЭО) постоянных разведочных кондиций для подсчета запасов железной руды Сиваглинского месторождения. Т. 5. Кн. 1. Экономическая часть. Определение параметров кондиций: доп. соглашение № 7 от 29.04.2015 г. к Договору № 75 от 16.05.2011 г. В 5 т, 9 кн., 2 папках.
15. Ермаков С. А., Хосоев Д. В. Технолого-экологическая оценка безвзрывной разработки вскрышных пород и углей Эльгинского месторождения // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2013. № 8-1. С. 56–58.
16. Баулин А. В., Бабенко О. Б., Белинкин А. А. Освоение Эльгинского каменноугольного месторождения // Уголь. 2002. № 1. С. 22–23.

Статья поступила в редакцию 26 сентября 2022 года

Technical and economic comparison of options for the development of complex structural formations of the Elga field

Dorzho Vladimirovich KHOSOEV*

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

Abstract

Relevance. In the conditions of the North, with a chronic shortage of material and energy resources in the extraction of minerals, the search for optimal technical, economic and environmental indicators is an urgent and urgent problem.

The purpose of the work is to show the effectiveness of the use of KSM-2000R combines in the development of coal seams of a complex structure in the Elga deposit.

Methodology: Perform comparative feasibility studies for options using cyclic and non-explosive technology using KSM-2000R combines.

Results. An analysis of the calculations performed showed that in the first option with cyclic technology, the structure by cost elements was 34.8% for electricity, 33.2% for depreciation, 28.3% for materials and 3.7% for labor costs. In the variant with the use of combines of the KSM-2000R type, the maximum cost indicators are 36.7% for depreciation, 29.7% for electricity, 27.9% for materials and 5.5% for labor costs. Calculations showed that when using combine harvesters, the cost of mining 1 ton of coal decreased by all elements by more than 27% compared to the cyclic technology. Also, the payroll number of workers decreased by 6 people and amounted to 30 people. In addition, the average monthly labor productivity of a worker in a team increased and amounted to 4046 tons / month.

Conclusions. Feasibility studies have been performed, on the basis of which it has been shown that the use of KSM-2000R combines is quite effective in the development of coal seams of complex structure. The conditional annual savings amounted to 57.248 thousand rubles with the non-explosive technology variant compared to the cyclic technology variant. Net present value (NPV) for nine years when using KSM-2000R combines amounted to 6296 million rubles. From an environmental point of view, the use of non-explosive technology based on KSM combines with dump trucks and conveyor transport at mining operations will reduce the negative impact on the environment by 1.5 times compared to cyclic technology. At the same time, the partial use of CCM in stripping operations will further reduce the negative impact – up to 1.7 times.

Keywords: cyclic technology, mining machine, non-explosive technology, coal seam, economic efficiency, materials, depreciation, prime cost.

REFERENCES

- 2010, Ways to improve the efficiency and environmental safety of open mining of solid minerals. V. I. Cheskidov [et al.]; Novosibirsk, 276 p. (*In Russ.*)
- 2009, Comprehensive development of subsoil: prospects for expanding the mineral resource base of Russia. Ed. by K. N. Trubetskoy [et al.]. Moscow, 454 p. (*In Russ.*)
- 2011, Modeling of thermal processes in a rock mass during open-pit mining of permafrost placers. A. S. Kurilko [et al.]. Novosibirsk, 139 p. (*In Russ.*)
- Khosoev D. V. 2022, Analysis of methods for calculating productivity for combines of the KSM type at the Elga field. *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal* [News of Higher Educational Institutions. Mining Journal], no. 4, pp. 7–16. (*In Russ.*) <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2022-4-7-16>
- Shemyakin S. A., Matveev D. N., Cheban A. Yu. 2015, Economic substantiation of the effectiveness of non-explosive selective extraction of minerals and host rocks using technical and technological complexes based on milling combines. *Gornyy zhurnal* [Mining Journal], no. 2, pp. 43–46. (*In Russ.*) <https://doi.org/10.17580/gzh.2015.02.07>
- 2005, World mining industry. History. Progress. Production. Moscow, 520 p. (*In Russ.*)
- 2007, Non-explosive technologies of open mining of solid minerals. Mattis [et al.]. Ed. by V. N. Oparin. Novosibirsk, 336 p. (*In Russ.*)
- Krasnyansky G. L., Shteintsaig R. M., Rudol'f W., Kovalenko S. K. 1998, Experience in creating and prospects for the development of new generation machines KSM-2000RM in the mining industry. *Ugol'* [Coal], no. 4, pp. 16–21. (*In Russ.*)
- Aleshin B. G., Kovalenko S. K., Vinitkiy K. E., Shenderov A. I., Shteintsaig R. M. 1996, Structural and technological features and prospects for the use of machines of the KSM type in the open pits of Russia. *Gornyy vestnik* [Mining Bulletin], no. 4, pp. 13–19. (*In Russ.*)
- Khosoev D. V. 2016, Evaluation of the mining conditions of the Elga deposit from the standpoint of the use of mining machines. *Gornaya promyshlennost'* [Mining industry], no. 6(130), pp. 81–83. (*In Russ.*)
- Ermakov S. A., Khosoev D. V. 2018, Evaluation of the efficiency of selective mining of complex-structural seams of the Elga coal deposit *Gornaya promyshlennost'* [Mining industry], no. 2(138), pp. 73–74. (*In Russ.*) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2018-2-138-73-74>
- Nagovitsyn O. V., Lukichev S. V. 2016, Mining and geological information systems, scope and construction features. *Problemy nedropol'zovaniya* [Problems of subsoil use], no. 4, pp. 69–73. (*In Russ.*)
- Lukichev S. V. 2021, Digital Past and Future of Mining Enterprises. *Gornaya promyshlennost'* [Mining industry], no. 4, pp. 73–79. (*In Russ.*) <http://dx.doi.org/10.30686/1609-9192-2021-4-73-79>

✉ hosoev70@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-1466-8509>

14. Feasibility study (feasibility study) of permanent exploration conditions for calculating the iron ore reserves of the Sivaglinskoye deposit. Vol. 5. Book 1. Economic part. Determination of condition parameters: additional agreement No. 7 dated April 29, 2015 to Agreement No. 75 dated May 16, 2011. In 5 vols, 9 books, 2 folders. *(In Russ.)*
15. Ermakov S. A., Khosoev D. V. 2013, Technological and environmental assessment of non-explosive development of overburden rocks and coals of the Elga deposit. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy* [International Journal of Applied and Fundamental Research], no. 8-1, pp. 56–58. *(In Russ.)*
16. Baulin A. V., Babenko O. B., Belinkin A. A. 2022, Development of the Elga coal deposit. *Ugol'* [Coal], no. 1, pp. 22–23. *(In Russ.)*

The article was received on September 26, 2023

История горного дела

<http://doi.org/10.21440/2307-2091-2023-1-148-156>

Александр Васильевич Калугин (1857–1933) и бывший калугинит (ныне джансит-(CaMnMg))

Aleksandr Vasil'evich Kalugin (1857–1933) and former kaluginite (now jahnsite-(CaMnMg))

Александр Георгиевич ШОРИН^{1*}
Юрий Викторович ЕРОХИН^{2}**
Сергей Юрьевич КРОПАНЦЕВ^{2*}**

Aleksandr Georgievich SHORIN^{1*}
Yuriy Viktorovich EROKHIN^{2}**
Sergey Yurievich KROPANTSEV^{2*}**

¹Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия

¹Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia

²Институт геологии и геохимии им. акад. А. Н. Заварицкого УрО РАН, Екатеринбург, Россия

²The Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russia

*sandy_blood@mail.ru

**erokhin-yu@yandex.ru

***Kropantsev_dem@mail.ru

*sandy_blood@mail.ru

**erokhin-yu@yandex.ru

***Kropantsev_dem@mail.ru

Аннотация

Александр Васильевич Калугин был крупным минералогом-практиком и составлял великолепные минералогические коллекции из уральских образцов. Работая в Уральском горном институте, он подготовил целую плеяду ученых-минералогов и передал институту свою уникальную коллекцию минералов, на основе которой в 1937 г. был создан Уральский геологический музей. В честь него в 1983 г. Б. В. Чесноков назвал новый минерал – калугинит, который практически сразу был отклонен Международной минералогической ассоциацией. На данный момент оказалось, что калугинит является джанситом-(CaMnMg).

Ключевые слова: А. В. Калугин, калугинит, джансит-(CaMnMg), минералогия, Урал.

Abstract

Aleksandr Vasil'evich Kalugin was a major practical mineralogist and compiled magnificent mineralogical collections from the Ural samples. While working at the Ural Mining Institute, he trained a whole galaxy of mineralogists and donated his unique collection of minerals, on the basis of which the Ural Geological Museum was created in 1937. In honor of him in 1983 B. V. Chesnokov named a new mineral – kaluginite, which was almost immediately rejected by the International Mineralogical Association. At the moment it turned out that kaluginite is jahnsite-(CaMnMg).

Keywords: A. V. Kalugin, kaluginite, jahnsite-(CaMnMg), mineralogy, Ural.

Александр Васильевич Калугин (фото 1) – российский и советский минералог-самоучка, известный коллекционер, первооткрыватель месторождения демантоида в окрестностях дер. Полдневая, один из основателей коллекционного дела на Урале. На основе его коллекции был создан Уральский геологический музей.

Ниже приведены основные даты жизни и деятельности А. В. Калугина [1–4]:

1857 – родился 21 июня в Екатеринбурге;

1874 – вместе с отцом открыл месторождение демантоида в окрестностях дер. Полдневая;

1877 – окончил прогимназию и поступил писарем в канцелярию Уральского горного правления;

1881 – вышел в отставку в чине коллежского регистратора;

1881 – открыл мастерскую по составлению минералогических коллекций;

1882 – получил бронзовую медаль на Всероссийской выставке в Москве;

1884 – родилась дочь Вера;

1887 – получил две малые серебряные медали на выставке в Екатеринбурге;

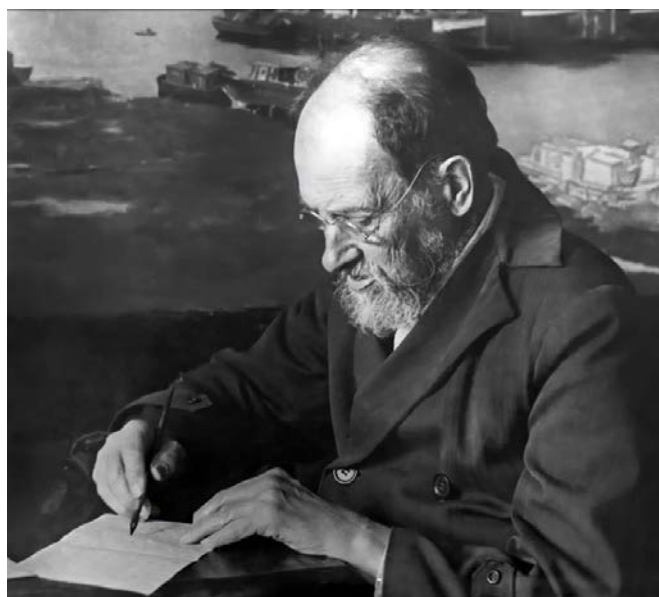


Фото 1. Александр Васильевич Калугин (1857–1933). Из архива С. Ю. Кропанцева

1888 – вручена благодарность на выставке в Копенгагене (Дания);

1890 – получил похвальный лист и большую серебряную медаль на выставке в Казани;

1896 – получил большую серебряную медаль на Всероссийской выставке в Нижнем Новгороде;

1904 – получил похвальный лист на Международной выставке в Санкт-Петербурге;

1908 – получил малую серебряную медаль на Морской выставке в Москве;

1911 – награжден большой серебряной медалью на Первой Западно-Сибирской выставке в Омске;

1919 – стал препаратором при минералогическом музее в Уральском горном институте;

1921 – вместе с К. К. Матвеевым посетил Уральские изумрудные и Асбестовые копи;

1925 – повысили разряд с 11-го по 12-й;

1926 – исполнял обязанности младшего ассистента, а потом стал лаборантом в УПИ (позже в УГИ);

1933 – умер в Свердловске 19 марта.

Об Александре Васильевиче написано не так много заметок и воспоминаний [1–4], поэтому мы постараемся дать сводную биографию этого замечательного человека.

А. В. Калугин родился 21 июня 1857 г. в г. Екатеринбурге Пермской губернии (ныне – Свердловская область), в семье камнерезных дел мастера Василия Гавриловича Калугина. Отец маленького Саши работал на Екатеринбургской гранильной фабрике и был крупным специалистом по резьбе поделочного камня. За участие в качестве подмастерья в изготовлении вазы из калканской яшмы в 1851 г. он был награжден медалью [5], а в 1859 г. за успешную работу на фабрике ему был пожалован бриллиантовый перстень ценой 150 рублей серебром. Еще с детства Василий Гаврилович занимался сбором и продажей камней, а к зрелости у него была внушительная коллекция руд и минералов, поэтому неудивительно, что маленький Саша тоже стал увлекаться коллекционированием.

Род Калугиных был многочислен и ветвист. Знаток истории художественной обработки камня Б. П. Павловский [5] насчитал почти дюжину мастеров Калугиных, работавших на Екатеринбургской гранильной фабрике и на Горнощитском заводе в конце XVIII–первой половине XIX в. Были они выходцами из Калужской губернии, откуда (из Калуги) предок Калугиных, знакомый с камнерезным искусством, был затребован на Петергофскую гранильную фабрику и в 1765 г. был переведен в Екатеринбург, тоже на гранильную фабрику. Он-то и дал начало роду горщиков Калугиных: камнерезов, гранильщиков и коллекционеров [4].

Про детство маленького Саши ничего не известно. Возможно, он проводил время на гранильной фабрике. Будучи подростком, он в 1870 г. посетил мануфактурную ярмарку в Санкт-Петербурге, а в 1873 г. съездил в Вену на Всемирную ярмарку, что говорит о хорошем достатке в семье. В этом же 1873 г. отец отдал его учиться в прогимназию. Такие четырехклассные учебные заведения в России были открыты вскоре после отмены крестьянского права. Программа обучения в них соответствовала первым четырем классам мужской классической гимназии.

Оканчивающие прогимназию могли поступать в пятый класс обычной гимназии без дополнительных экзаменов. К сожалению, молодому человеку учиться больше не пришлось. Возможно, отец решил, что довольно того, что старший сын Петр стал инженером, окончив в столице технологический институт [4].

Интересно, что в самом начале обучения Александр вместе с отцом открыли месторождение демантоида. Было это летом 1874 г. во время поездки из Подднейвой в Верхний Уфалей, когда в районе реки Посакаухи Василий Гаврилович в перемытых отвалах обнаружил прозрачные зерна желтовато-зеленого цвета. Это был демантоид, но отец ошибочно определил его как хризолит. Возможно, на это повлияла относительно недавняя находка ювелирного оливина на берегах рядом расположенного озера Иткуль [6]. В любом случае уже в 1878 г. А. А. Лёш доказал, что подднейской хризолит является демантоидом [7].

В апреле 1877 г., после окончания прогимназии, двадцатилетний Александр поступает на работу писарем в канцелярию Уральского горного управления. По всей видимости, работу он получил по протекции старшего брата Петра, который на тот момент был управляющим Кыштымскими горными заводами, а позже стал управителем золотыми приисками в Невьянском округе. Проработав чиновником около 5 лет, Александр Васильевич в октябре 1881 г. неожиданно ушел в отставку в чине коллежского регистратора (самый низший чин в имперской иерархии, чиновник 14-го класса).

Спустя два месяца после отставки, уже в декабре, он открыл в своем доме (который находился по адресу: ул. Красноармейская, д. 3) первую на Урале мастерскую по изготовлению минералогических коллекций, а также магазин по продаже коллекций и прочих каменных вещей, получив от городских властей свидетельство и билет на торговлю и промышленное заведение. Александр Васильевич принял решение об открытии собственного дела, конечно же, не спонтанно и не единолично. В семье оно, вероятно, долго обмозговывалось и обсуждалось, а государственная служба, по-видимому, нужна была, чтобы накопить первоначальный капитал. Кто надоумил его заняться изготовлением именно минералогических коллекций? Ответ очевиден: во-первых, отец, а во-вторых, брат Петр, у которого тоже была шикарная коллекция минералов [4].

Первая же выставка, и не абы какая, а Всероссийская, приуроченная к коронации Александра III и поэтому устроенная в Москве (декабрь 1882 г.), принесла ему бронзовую медаль «За изделия из твердых сибирских камней, красиво подобранных и отлично отшлифованных». Первый успех Александр Васильевич оценил критически. Из разговоров с посетителями выставки он понял, что люди, восхищаясь красотой камня и совершенством его обработки, хотели бы знать о нем еще больше (не только название, но и происхождение, месторождение и область его практического применения). Другими словами, образцы из коллекции должны сопровождаться квалифицированным описанием, что позднее и было учтено [4].

В 1884 г. у Александра Васильевича родилась дочь Вера. При этом, когда он успел жениться и кем была жена,

сейчас узнать практически невозможно. К сожалению, сам Александр Васильевич был поразительно скуп в рассказах о семье, особенно своей. В его воспоминаниях фигурируют только отец и старший брат.

В июле 1887 г. на Урало-Сибирской научно-промышленной выставке, которая проходила в Екатеринбурге, Александр Васильевич получил аж две малые серебряные медали – «За наглядное изображение Среднего Урала, собранное из камней по месту их нахождения, и хорошую коллекцию минералов с описанием как Урала, так и минералов» и «За хорошие изделия из яшм и цветных камней». Интересно, что каменную модель Среднего Урала после закрытия выставки за 400 рублей выкупили городская и уездная управы и подарили сыну Его Императорского Величества великого князя и августейшего покровителя УОЛЕ Михаила Николаевича – Сергею Михайловичу. Они как раз инспектировали уральские заводы и посетили выставку. Молодой князь лично в течение получаса выслушивал объяснения Александра Васильевича об изготовленном им каменном макете Среднего Урала. После этого каменную модель отправили в Санкт-Петербург, и далее ее след затерялся [4].

Именно на этой Урало-Сибирской научно-промышленной выставке начал свое восхождение демантоид, который до этого ценился достаточно дешево.

На ярмарке в виде огранки были представлены различные спектры ювелирного андрадита – от зеленого демантоида до желтого топазолита. Это тоже был успех А. В. Калугина, к популяризации этих драгоценных камней он приложил немало усилий.

В следующем 1888 г. Александр Васильевич экспонировал свои коллекции за рубежом в Копенгагене (Дания). Фурора не случилось, но и незамеченными они не стали. Автора отметили благодарностью.

В 1889 г. вышел в свет первый в истории города Екатеринбурга справочник «Весь Екатеринбург», где А. В. Калугин был упомянут как чиновник-купец, проживающий в двухэтажном каменном доме с деревянными службами и баней [4].

В 1890 г. в Казани Александр Васильевич получил похвальный лист «За модель Среднего Урала и коллекцию минералов в 1000 образцов как учебное пособие», а также большую серебряную медаль как предприниматель и менеджер «За поддержку каменно-гранильного промысла и хорошее ведение дела».

В 1893 г. А. В. Калугин расширил дело и пригласил отдельных кустарей-одиночек, которые до этого работали по домам. Они занялись изготовлением каменных изделий и собирали коллекции. В 1895 г. мастера Калугина сделали минералогическую коллекцию для некоего Ф. Мерка, жившего в Дармштадте, а хозяин сопроводил ее

Наш общий японский друг

В самом конце 1932 года в Уральском горном институте, который после целой серии реорганизаций неожиданно вернул себе название, полученное еще при рождении, появился новый преподаватель. Был он чрезмерно худ, имел бритую голову и круглые очки, а также имя, вызывавшее у студентов приступы смеха: Африкан Николаевич. Ходили слухи, что это ленинградский профессор, только что «отмотавший срок» в лагерях, что косвенно подтверждала его необычайная бледность, а также одежда, которая из-за его худобы казалась висящей на нем, как на вешалке. Впрочем, тогдашний Горный нельзя было не то, что испугать, но даже сколько-нибудь удивить подобным набором качеств – видали и не такое, и поэтому профессора Криштофовича (а именно такая была фамилия у преподавателя с чудным именем) встретили вполне спокойно, как и принято у уральцев: мол, посмотрим на тебя и сами все увидим. И вскоре увидели, что в своем предмете, а вел он палеоботанику, Криштофович – звезда первой величины.

Большинство коллег, конечно, и так знали его уровень, но «приглядеться» к человеку – святое дело. Что же касается студентов, то смешки по поводу имени были быстро ликвидированы не только характером профессора, который корни имел из украинских казаков, никогда не отличавшихся излишним либерализмом, но и харизмой истинного ученого, слово которого – на вес золота.

Вот так и влился в число сотрудников Уральского Горного один из основоположников советской палеоботанической школы и «властитель умов» в этой области Африкан Криштофович. До этого он читал лекции в вузах Ленинграда, но в 1930-м попал под чистку, сегодня известную как «Дело академии наук» – своего рода «асфальтовый каток», под который ОГПУ «закалато» немало ученых. Криштофовичу еще повезло: после полутора лет, проведенных в легендарной питерской тюрьме «Кресты», он, благодаря ходатайству многочисленных коллег, вышел оттуда приговоренным лишь к ссылке, но без запрета чтения лекций, чем и не преминул воспользоваться в Свердловске.

Поэтому, когда уже в начале 1933 года Африкан Николаевич заглянул на кафедру минералогии, чтобы осмотреть собранную здесь коллекцию камней, это был уже визит не преподавателя-новичка, а всеми уважаемого коллеги, который что называется «почтил вниманием». Вот только заведующий этой кафедрой профессор Константин Константинович Матвеев – человек талантливый, но самолюбивый и вечно опасющийся конкуренции, предпочел уклониться от длительного общения с именитым гостем. Сказавшись занятым, он предпочел оставить его на попечение своего лаборанта. Однако именно это обстоятельство и стало ключевым для завязки нашей истории.

каталогом, написанным по-немецки.

На Всероссийской выставке в 1896 г. в Нижнем Новгороде коллекцию А. В. Калугина опять оценили высоко и присвоили большую серебряную медаль «За вполне чистую работу и полировку изделий из твердых горных пород». В этом же году у фирмы Калугина появился конкурент. Геолог-практик Е. Н. Коротков, хранитель музея УОЛЕ, открыл мастерскую по изготовлению учебных коллекций, которая просуществовала до 1917 г. [4].

В 1898 г. мастера Калугина сделали минералогическую коллекцию для некоего Ф. Кранца, жившего в Бонне.

В 1899 г. в Путеводителе по Уралу (изд. В. Г. Чекан) Александр Васильевич привел списки минералов из всех горнозаводских дач Урала. Спустя полвека доцент СГИ Г. Н. Вертушков охарактеризовал эту работу как «основательную сводку по топоминералогии Урала».

В новом ХХ в. А. В. Калугин выставочную деятельность начал скромно, он представил на Международной выставке изделий из металла и камня, проходившей в конце 1903 – начале 1904 г. в Санкт-Петербурге, рядовую коллекцию минералов Урала и Сибири, получив за нее только похвальный лист [4].

В 1908 г. на Морской выставке в Москве Александр Васильевич, не мудрствуя лукаво, снова экспонировал «казанскую» модель Среднего Урала и получил за нее

малую серебряную медаль. В этом же году он продал ее за 500 рублей екатеринбургскому гранильщику А. П. Боровских, который переехал в Москву и открыл там мастерскую под названием «Урал». В витрине своего заведения он выставил калугинскую модель [4].

В 1909 г. мастера Калугина сделали минералогическую коллекцию для профессора Георга Стамати, работавшего тогда в Берлине. Стамати был восхищен коллекцией и в письме к А. В. Калугину написал, что он ее демонстрировал во время чтения лекции в Сельскохозяйственной академии, а слушавшая публика удивлялась, что в России есть люди, так глубоко интересующиеся минералогией.

В 1911 г. на Первой Западно-Сибирской выставке в Омске коллекция Александра Васильевича была награждена большой серебряной медалью с формулировкой «за хороший систематический подбор минералов, горных пород и металлов». Коллекция была небольшой, всего из 250 образцов, но великолепно подобрана, к тому же к ней прилагалось описание на 380 стр., почти книга. Коллекцию за 40 рублей выкупил профессор Императорского Токийского университета Котора Джимбо (1867–1924), который на тот момент совершал кругосветное путешествие [4]. Судя по всему, профессор с Александром Васильевичем подружился, так как коллекция была продана за очень небольшие (можно сказать, символические) деньги. Интересно, что в честь



Лаборантом, на которого Матвеев «бросил» своего именитого коллегу, оказался Александр Васильевич Калугин. Однако Матвеев никаких подробностей Криштофовичу о своем «лаборанте» не сказал, поэтому тот сначала лишь был раздосадован странным «гостепримством».

Глядя на обширную лысину и седую бороду 76-летнего Калугина, который заметно подрагивающими руками обшаривал стол в поисках очков, Африкан Николаевич, которому едва исполнилось 47, видел перед собой лишь глубокого старика. Однако тем большим было его удивление, когда этот престарелый человек стал брать в руки образцы коллекции кафедрального музея и рассказывать о них. Он не просто знал название любого, но и рассказывал о районе его происхождения, о сопутствующих породах, а зачастую – и подробностях находки.

Мгновенно сообразив, что перед ним – истинный знаток своего дела, для которого каждый из этих камней наполнен личной историей, Криштофович тут же забыл о своей досаде. Будучи палеоботаником, сам он отлично знал и геологию, но никогда не занимался углубленно минералогией, и уж тем более – уральскими камнями, и поэтому был потрясен знаниями этого неприметного старика, впитывая их, как губка. А уж когда решил начать задавать вопросы, то уже окончательно удостоверился, что перед ним – истинный клад информации об уральских месторождениях.

И лишь после того, как незаметно прошло несколько часов, Криштофович, к своему ужасу, вдруг понял, что не знает имени своего собеседника.

– Простите, уважаемый коллега, но я ведь до сих пор не знаю вашей фамилии и имени-отчества.

– Калугин Александр Васильевич, – старомодно поклонился тот.

Представившись в ответ, Криштофович спросил:

– Какой университет вы закончили и где можно почитать ваши публикации?

– Я не из ученых, университетов не заканчивал. Я – горщик уральский. Слыхали у вас в столицах про таких?

Про горщиков Африкан Николаевич слышал, конечно, но представлял их себе скорее крестьянами-самоучками, а на этот образ собеседник похож не был. И еще – ему не давала покоя фамилия собеседника, показавшаяся ему знакомой.

Неожиданно он хлопнул себя по лбу и выпалил:

– Простите, любезный, но не тот ли вы самый Калугин, которого считал своим другом мой уважаемый коллега из Японии, профессор Токийского университета Котора Джимбо? Как-то он сказал мне, что его друг из Екатеринбурга по фамилии Калугин – лучший знаток уральских камней.

Сказал – и осекся. Полтора года в «Крестах» приучили его не рассказывать лишнего малознакомым людям, а тут вдруг вырвалось:

японского профессора тоже назвали новый минерал, борат марганца – джимбоит.

Этот профессор, в 1913 г. посетив Женевский университет и осмотрев уральскую коллекцию минералов, собранную в 1820 г. Якобом Мором, прислал А. В. Калугину письмо о своих впечатлениях. В этом же 1913 г. Александр Васильевич за 500 рублей якобы (см. разъяснения далее) продал свою коллекцию (около 3000 обр.), которую он собирал всю свою сознательную жизнь, владельцу магазина каменных вещей А. А. Никольскому [4].

В 1916 г. Александр Васильевич, видимо, по протекции профессора К. Джимбо, получил благодарность и иллюстрированную книгу из Японии за коллекцию. В этом же 1916 г. А. В. Калугин продал за 500 рублей большую коллекцию (около 1000 обр.) в Лондон Р. И. Мертенсу. Новый владелец коллекции в качестве рекламы выставил ее на улице возле конторы своей фирмы [4].

После открытия в 1917 г. Уральского горного института А. В. Калугин неоднократно поставлял в учреждение коллекции минералов (это записано со слов К. К. Матвеева, который сам был принят на работу в УГИ в конце 1918 г.).

Началась Гражданская война, и вдруг неожиданно в сентябре 1919 г. А. В. Калугин был принят препаратором в Уральский горный институт. Коллекция Александра

Васильевича тоже попала в горный институт в качестве учебного пособия. Причем кто-то утверждает, что она была приобретена К. К. Матвеевым в 1919 г. лично у А. В. Калугина [2], а другие пишут, что К. К. Матвеев купил ее у А. А. Никольского в 1924 г. [4].

У авторов на данный период жизни А. В. Калугина есть альтернативная версия, которая была изложена В. П. Сырчиным, последним учеником известного уральского горщика Василия Владимировича Шахмина (со слов последнего). Кстати, В. В. Шахмин, бывший родом из другой известной династии камнерезов, был другом А. В. Калугина. В середине июля 1919 г. белогвардейские войска быстро откатывались с Урала под ударами Красной Армии, а вместе с ними массово побежали зажиточные жители Екатеринбурга. Александр Васильевич, будучи состоятельным гражданином, тоже поддался панике. Он продал свое дело и коллекцию В. В. Шахмину и уехал с насиженного места. Куда он поехал, неизвестно, но вполне возможно, что он добрался до Владивостока, так как у него в друзьях был профессор К. Джимбо и, вероятно, А. В. Калугин рассчитывал некоторое время пожить в Японии. Видимо, что-то не срослось, и уже в начале 1921 г. Александр Васильевич вернулся в Екатеринбург, так как остался без средств к существованию. Надо было как-то жить. Он обратился с просьбой к В. В. Шахмину о безвозмездном возврате части коллекции, чтобы с ней



– С кем-то вы меня путаете, уважаемый, – ответил Александр Васильевич. – Калугины – распространенная фамилия, и знатоков камня здесь достаточно. Многие камни знают с детства, потому что деды наши и прадеды их добывали и обрабатывали.

И так как-то просто он сказал об этом, что Криштофович устыдился своего страха. Поэтому как ни в чем не бывало продолжил:

– Славный у вас род, уважаемый Александр Васильевич. И вам, наверное, будет интересно узнать, что фамилию вашу знают даже в Японии.

После чего рассказал Калугину о том, как в 1917 году был включен в состав организованной Геолкомом научной экспедиции на Сахалин, в ходе которой был командирован в Японию, где и познакомился с профессором Которо Джимбо, с которым не только сотрудничал, но и подружился. Отношения их стали настолько хорошими, что уже в 1919 году, возвращаясь из очередной поездки на Сахалин, обратный путь он выбрал через Японию, чтобы иметь возможность еще раз поработать в научной библиотеке Токийского университета и пообщаться с Джимбо.

– Как-то профессор Джимбо рассказал мне о том, как он, совершая кругосветное путешествие, посетил Сибирь, где занялся поиском коллекций минералов и горных пород для своего университета. Такую коллекцию он разыскивал в Омске, но там ему помогли лишь советом: доехать до Екатеринбурга и уже там обратиться в мастерскую некоего Калугина, который недавно представил красивую коллекцию минералов на Западно-Сибирской выставке, которая проходила как раз в Омске. Добравшись до Екатеринбурга, Которо Джимбо разыскал нужную мастерскую, где и познакомился с Калугиным. Тот встретил иностранного гостя с истинно русским гостеприимством, и в итоге коллекция камней, побывавшая на выставке в Омске, была продана Токийскому университету за символические 40 рублей. Гораздо дороже обошлась доставка тяжелого груза – 250 образцов и прилагающийся к ним 380-страничный каталог – из Екатеринбурга в Токио, которую пришлось организовывать сначала по железной дороге во Владивосток, откуда – при содействии японского консульства – пароходом «Хозун-Мару» в Токио. Причем организацию этой сложной перевозки Калугин взял на себя! Профессор Джимбо был так ему благодарен, что с той встречи всегда называл его другом, а позже писал ему о продолжении своего путешествия – из Женевы. Ну, а вернувшись в Японию, написал Калугину письмо с рассказом о том, что в университете его коллекцию поместили в новой витрине из белого дерева, а также прислал подарок: богато иллюстрированную фотографией книгу о местечке Ицзу на двух языках – английском и маньчжурском...

Александр Васильевич слушал рассказ Криштофовича с большим вниманием. В какой-то момент Африкану Николаевичу даже показалось, что глаза его заблестели.

Словесно же прокомментировал он его просто:

– О какой-то совсем другой жизни вы рассказываете, уважаемый: экспедиции, выставки, кругосветные путешествия. Женевы, Токио... И это вы, профессора, все между собой общаетесь, а потом называете в честь друг друга каких-нибудь новых трилобитов. Мы же тут попроще живем, звезд с неба не хватем...

пойти на поклон к профессору К. К. Матвееву. Шахмин другу не отказал, и А. В. Калугин устроился на работу в УГИ. Кто-то спросит, а как же трудовая книжка, которая до сих пор хранится в УГГУ? А там дело А. В. Калугина было начато с 1927 г. и все предыдущее записано со слов самого Калугина (до 1919 г.) и К. К. Матвеева (с 1919 по 1927 г.). Последнее звучит как «удостоверено профессором К. К. Матвеевым 1 июня 1927 г. за № 96», т. е. К. К. Матвеев, видимо, написал объяснительную записку, где и как якобы работал А. В. Калугин.

Кстати, эта версия событий объясняет, как оказалась коллекция Калугина в стенах УГИ и, понятное дело, ее вообще не покупал К. К. Матвеев ни в 1919, ни в 1924 г. Дело в том, что Константин Константинович был очень беден (читайте его биографию в [8, 9]) и никакими внушительными суммами для покупок коллекции не обладал. У него семья голодала, и он даже занимал деньги у своих студентов и аспирантов, в частности, у Г. Н. Вертушкова [8, 9]. Сам УГИ в это время испытывал сложные времена развития [10], и денег для покупки коллекций не было, тогда все голодали – и студенты, и преподаватели. И если бы УГИ, а позднее УрГУ, вдруг изыскали бы какие-нибудь средства, то в личном деле К. К. Матвеева должны были быть расписки за крупные суммы или акты передачи коллекции в фонд института, но их нет (мы смотрели).

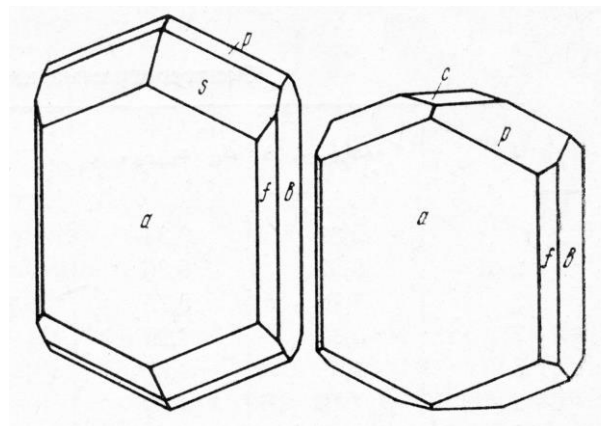


Фото 2. Кристаллы калугинита: $c\{001\}$, $b\{010\}$, $a\{100\}$, $f\{130\}$, $p\{111\}$, $s\{211\}$ [11]

В любом случае Александр Васильевич к лету 1921 г. находился в Екатеринбурге и работал препаратором в институте, так как в августе они вместе с К. К. Матвеевым выезжали на полевые работы в район Изумрудных и Асбестовых копей.

В 1923 г. А. В. Калугин, секретарь секции кустарей камнерезного производства на выставке, посвященной 200-летию Екатеринбурга, был награжден книгой «Екатеринбург за 200 лет (1723–1923)».

На том и попрощались.

Позже Африкан Николаевич расспрашивал коллег об удивительном «лаборанте», и многие отзывались о нем с глубоким уважением: человек без образования, но знаток камней, ведет практики у студентов. Ну а уральские камни знает лучше многих профессоров.

Как-то, уже в марте, Криштофович даже заглянул к нему, чтобы снова поговорить. Однако с прискорбием узнал, что Александр Васильевич на днях скончался.

А снова вспомнил о нем лишь в апреле, когда после очередной лекции к нему в коридоре подошла женщина лет пятидесяти.

– Здравствуйте, Африкан Николаевич. Я – Вера Александровна, дочь Александра Васильевича Калугина. Нашла вас по его просьбе...

Женщина явно смущалась и чувствовала себя не в своей тарелке, но при этом была преисполнена решимости человека, выполняющего важное дело.

Криштофович пригласил ее в преподавательскую, где предложил чаю. И там она вытащила из сумки большую тяжелую книгу.

Протянула ему со словами:

– Александр Васильевич незадолго до смерти наказал передать ее Вам. Сказал: «Ему нужнее будет».

Еще даже не взяв ее в руки, Африкан Николаевич, вдруг понял, что это за книга. Загадал – и не ошибся: это была книга о небольшом городе Ицзу на двух языках: английском и маньчжурском. Бережно развернув, увидел дарственную надпись Калугину и подпись: *Kotora Jimbo*.

Постскриптум

Калугин, упомянувший в разговоре с Криштофовичем о том, что «профессора любят называть в честь друг друга каких-нибудь новых трилобитов», оказался прав: с именем Криштофовича связаны 85 новых видов флоры и фауны, горный хребет Курильской гряды и даже кратер на Марсе. Оказался не обойден вниманием и японский профессор Котора Джимбо, имя которого носит не только окаменевшая *Stenopteria jimboi*, но и минерал – джимбоит.

Немного недооценил он только себя, не ожидая того, что в 1983 году известный ученый Борис Валентинович Чесноков решит в честь него назвать новый минерал калугинитом. Что же касается того, что минерал этот оказался уже открытым джанситом – то это очень напоминает историю о том, как его отец, открывший месторождение демантоида, до конца жизни считал, что нашел всего-навсего россыпь хризолита. Видимо, семейное невезение передалось.

а

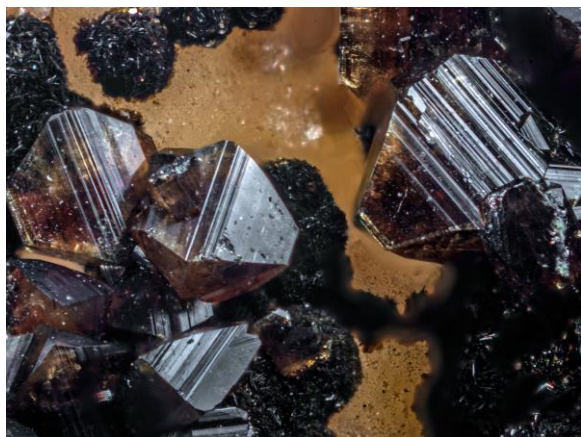


б



Фото 3. Джансит-(CaMnMg): а – щетка кристаллов на породе; б – сросток расщепленных кристаллов, США. С сайта mindat.org

а



б



Фото 4. Джансит-(CaMnMg): а – щетка кристаллов на породе; б – увеличенный фрагмент, Южная Дакота, США. С сайта mindat.org

В 1924 г. коллекция уральских и сибирских минералов на 3000 образцов, которую собирал Калугин с 1874 по 1919 г., якобы (см. разъяснения ранее) приобретена Уральским горным институтом. Это записано со слов профессора К. К. Матвеева. Во-первых, тогда уже не было УГИ, во-вторых, не указано кто является продавцом, и в-третьих, это якобы та же коллекция, которую купил в 1913 г. А. А. Никольский. Тогда непонятно, как ее Калугин пополнял до 1919 г. Из этого следует, что эта запись ложная и сделана она для того, чтобы легализовать, вдруг ниоткуда появившиеся образцы на кафедре минералогии, а также чтобы повысить значимость А. В. Калугина для института. Кстати, эта коллекция в 1937 г. послужила основанием для создания Уральского геологического музея.

В 1925 г. Александр Васильевич как «ценный работник для минералогического музея» был повышен в разряде с 11-го по 12-й. В 1926 г. он стал членом учредителей кружка «Друзей минералогии», а осенью этого же года он пару месяцев исполнял обязанности младшего ассистента. В ноябре его повысили до лаборанта (в 69 лет). При этом Александр Васильевич занимался коллекциями при кафедре минералогии и вел практические занятия у студентов, так как обладал обширными познаниями по минералогии Урала.

Скончался Александр Васильевич в Свердловске 19 марта 1933 г. в возрасте 76 лет. Умер он на руках дочери

Веры в своем двухэтажном доме, который к тому времени власти реквизировали и превратили в коммунальный дом, где ему как бывшему владельцу выделили комнату. Александр Васильевич был настоящим подвижником, он смог организовать свое дело, понять природу камня и создать прекрасные изделия и коллекции. К сожалению, старость его выпала на суровые времена, он лишился практически всего, но все равно нашел в себе силы и продолжил заниматься любимым делом. Как знаток камня он обучал наших будущих ярких уральских ученых: Г. Н. Вертушкова, Ф. И. Рукавишникову, А. Н. Игумнову и многих других.

В честь Александра Васильевича в 1983 г. был назван новый минерал – калугинит [11]. Известный ученый Борис Валентинович Чесноков летом 1979 г. в жиле гранитного пегматита копи № 232 (южный берег оз. Большой Таткуль) обнаружил скопление триплита с разнообразными продуктами изменения в виде основных водных фосфатов (Mn, Mg, Fe, Al, Ti), франколита, гидроокислов марганца и железа. Среди них был обнаружен и другой новый минерал – ушковит [12].

Калугинит был встречен в виде небольших (до 1 мм) кристаллов на стенках полостей в измененном триплите совместно с кристаллами ушковита, натечными агрегатами окислов марганца, мелкими кристаллами и почками франколита.

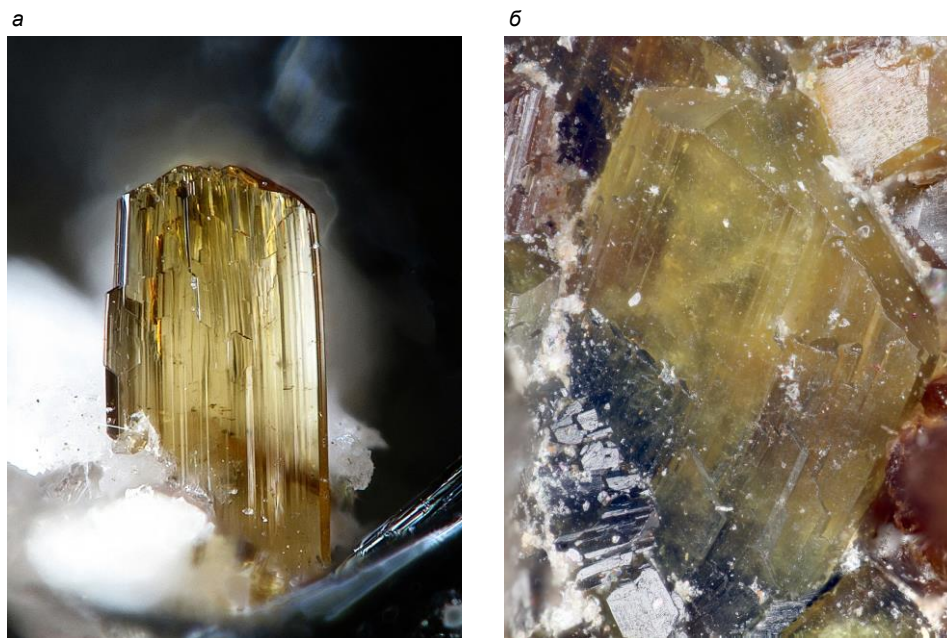


Фото 5. Джансит-(CaMnMg): а – кристалл на породе; б – кристалл в породе, Южная Дакота, США. С сайта mindat.org

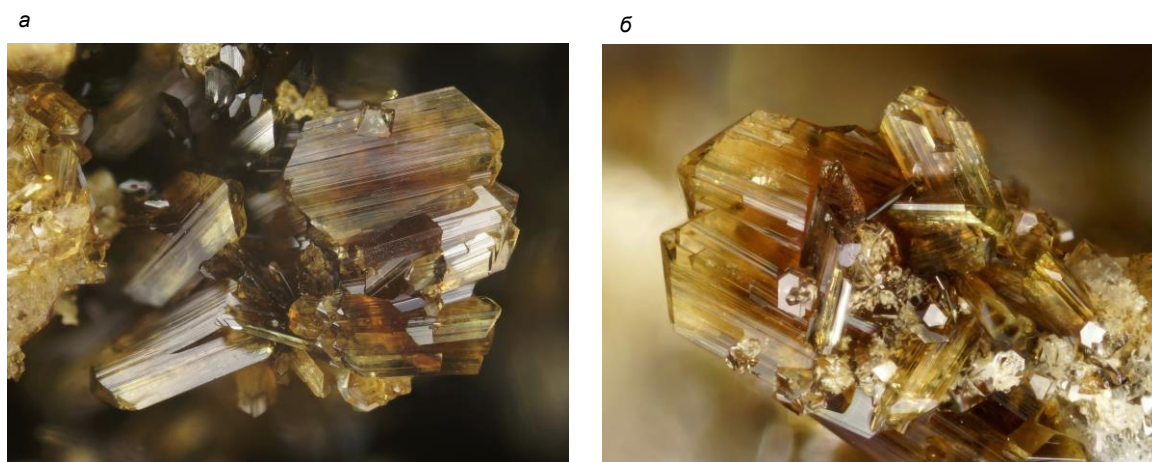


Фото 6. Джансит-(CaMnMg): а – параллельно-шестоватый сросток кристаллов; б – сросток кристаллов, Южная Дакота, США. С сайта mindat.org

Кристаллы калугинита имеют таблитчатый облик. Они относятся к бипирамидальному виду симметрии ромбической сингонии. Отношение осей $a : b : c = 0,833 : 1 : 0,398$. Кристаллы уплощены по $\{100\}$ и несколько вытянуты по $[001]$. Главные формы: $c\{001\}$, $b\{010\}$, $a\{100\}$ – пинакоиды, $f\{130\}$, $r\{111\}$, $s\{211\}$ – ромбические дипирамиды (фото 2).

Кристаллы от светлого желтовато-зеленоватого до зеленовато-желтого. Прозрачные или просвечивают. Черта – белая с желтоватым оттенком. Блеск – сильный стеклянный у граней до жирноватого на изломе. В ультрафиолетовых лучах не люминесцирует. Спайность несовершенная по $\{010\}$. Излом неровный, хрупкий. Твердость – около 3,5 по шкале Мооса. Плотность – 2,69 г/см³ (уравновешивание прозрачных кристаллов в растворе бромформа с ксилолом), вычисленная плотность – 2,70 г/см³. Растворяется в соляной кислоте.

Оптические свойства определены в иммерсии (белый свет): $n_g = 1,658(2)$, $n_m = 1,642(2)$, $n_p = 1,627(2)$, $n_g - n_p = 0,031$. Двуосный, отрицательный, угол $2V$ около 90°

($2V_{\text{выч}} = 89^\circ$). В иммерсии в кристаллах видны полисинтетические двойники.

Химический состав калугинита, полученный микронзондовым анализом, следующий, мас. %: Mg – 5,92; Mn – 10,07; P – 16,18; Al – 0,30; Fe – 11,95; Ca – 4,76; H₂O – 20,78 (определена как потеря массы при плавлении пробы в закрытой трубке). Данные анализа пересчитываются на следующую эмпирическую формулу – $(\text{Mn}_{0,54}\text{Ca}_{0,46})_{1,00}(\text{Mg}_{0,94}\text{Mn}_{0,06})_{1,00}(\text{Fe}^{3+}_{0,83}\text{Mn}_{0,11}\text{Al}_{0,04})_{0,98}(\text{PO}_4)_{2,02}(\text{OH})_{1,00} \cdot 3,96\text{H}_2\text{O}$ или $\text{MnMgFe}^{3+}(\text{PO}_4)_2(\text{OH}) \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, т. е. фосфат относится к группе оверита.

Рентгеноструктурное изучение калугинита показало следующие отражения, Å: 9,38; 6,37; 5,76; 5,00; 4,69; 4,10; 3,93; 3,52 и др. Пространственная группа минерала определена как *Csca* на основании монокристалльной съемки. Параметры элементарной ячейки уточнены по порошкограмме: $a = 15,05(5)$ Å, $b = 37,37(10)$ Å, $c = 7,18(5)$ Å, $V = 4038,2$ Å³.

Удивительно, что Борис Валентинович опубликовал данные по новому минералу в обычном региональном сборнике [11], а не в каком-либо хорошем научном

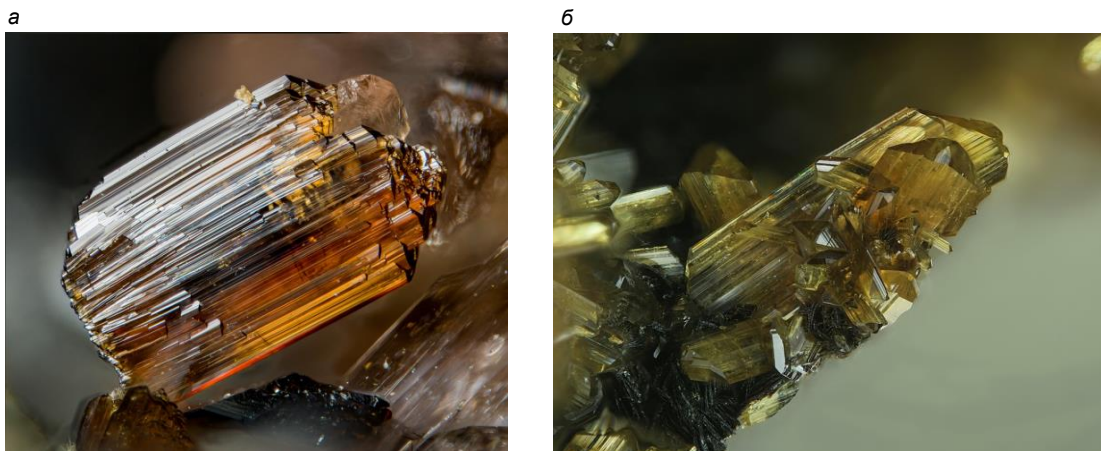


Фото 7. Джансит-(CaMnMg): а – кристалл со следами расщепления; б – сросток кристаллов, Южная Дакота, США. С сайта mindat.org

журнале – например, в Записках ВМО или Докладах АН СССР, где обычно и печатались сведения по новым минералам. Оказалось, что данные по калугиниту подавались Б. В. Чесноковым в Комиссию по новым минералам в 1983 г., но почему-то голосование за минерал было приостановлено, и он не был утвержден. Как бы там ни было, но в 1991 г. данные по калугиниту попали в официальную сводку по минералам на русском языке [13], а в 1993 г. они были опубликованы уже на английском языке [14], хотя в последней сводке упоминалось, что это пока не утвержденный минерал.

В 2015 г. оригинальный калугинит был доизучен известным минералогом И. В. Пековым методами электронно-зондового микроанализа и монокристалльной рентгенографии, и была показана его идентичность с джанситом-(CaMnMg). Это также подтверждено ИК-спектром, снятым Н. В. Чукановым. Предоставленные И. В. Пековым данные следующие: параметры моноклинной элементарной ячейки джансита-(CaMnMg): $a = 15,12(4)$, $b = 7,13(4)$, $c = 10,09(3)$ Å, $\beta = 110,7(3)^\circ$, $V = 1018(8)$ Å³. Первоначально ошибочное определение сингонии «калугинита» как ромбической связано с невозможностью разрешения дифракционной картины,

вызванной микродвойникованием кристаллов, на аппаратуре тех лет. Химический состав, мас. %: Na₂O – 0,19; CaO – 5,16; MgO – 7,72; MnO – 13,05; Fe₂O₃ – 17,85; Al₂O₃ – 0,27; TiO₂ – 0,42; P₂O₅ – 35,23; сумма 79,79. Эмпирическая формула на 18 атомов кислорода (O₁₆(OH)₂ = «O₁₈»): (Ca_{0,7}Na_{0,05})_{0,81}Mn²⁺_{1,0}(Mg_{1,58}Mn²⁺)_{0,42}(Fe_{1,84}Mn²⁺)_{0,10}Al_{0,04}Ti_{0,03})_{2,01}(PO₄)_{4,09}(OH)₂ · 8H₂O [15].

Таким образом, калугинит был неправильно выделен как новый минерал, им оказался уже известный на тот момент джансит-(CaMnMg), который назван в честь Ричарда Генри Джанса (1915–1983) американского минералога, крупного специалиста по пегматитам. Первое описание джансита было опубликовано в 1974 г., он был обнаружен среди продуктов изменения триплита в гранитных пегматитах Южной Дакоты (США) [16].

В целом джансит-(CaMnMg) – редкий минерал, который встречается исключительно в гранитных пегматитах как вторичный фосфат, замещающий триплит. Он ценится у коллекционеров, особенно если образует крупные выделения. Минерал был найден не только в России и США (фото 3–7), но и в Бразилии, Португалии, Китае и других странах мира.

ЛИТЕРАТУРА

- Архипова Н. П., Филатов В. В. Исследователи природы Урала. XX век. Екатеринбург: Изд-во «Екатеринбург», 2001. 272 с.
- Вертушков Г. Н. Александр Васильевич Калугин – один из основателей коллекционного дела на Урале // Записки ВМО. 1956. Ч. 85. Вып. 1. С. 95–99.
- Емлин Э. Ф. Очерки истории кафедры минералогии Уральского горного института. Екатеринбург: УГГУ, 2008. 257 с.
- Филатов В. В. Триада Калугина // Урал. 2011. № 1. С. 201–214.
- Павловский Б. П. Камнерезное искусство Урала. Свердловск: Свердлов. кн. изд-во, 1953. 152 с.
- Бек В. В. О хризолите (глинките), найденном на Урале // Горный журнал. 1849. № 6. С. 332–336.
- Лёш А. А. Об образе находений и свойствах «хризолита» // Записки Императ. Минералог. о-ва. 1878. Ч. XIII. С. 432–433.
- Шорин А. Г., Ерохин Ю. В. Константин Константинович Матвеев (1875–1954) и бывший матвеевит (ныне беньякарит) // Известия УГГУ. 2022. Вып. 1 (65). С. 179–189.
- Емлин Э. Ф. К. К. Матвеев – ректор и основатель кафедры минералогии в Уральском горном институте (из истории уральской науки) // Известия вузов. Горный журнал. 2002. № 3. С. 165–184.
- Филатов В. В. Отечества пользы для... (75 лет Уральскому горному институту, 1917–1992). Екатеринбург: Изд-во УГУ, 1992. 408 с.
- Чесноков Б. В., Вилисов В. А., Поляков В. О., Бушмакин А. Ф. Новые фосфаты из Ильменского заповедника // Минералы и минеральное сырье горно-промышленных районов Урала: сборник науч. трудов. Свердловск: УрО АН СССР, 1989. С. 3–10.
- Чесноков Б. В., Вилисов В. А., Черепивская Г. Е., Горская М. Г. Ушковит MgFe³⁺(PO₄)₂(OH)₂ · 8H₂O – новый минерал // Записки ВМО. 1983. Ч. 112. Вып. 1. С. 42–46.

Статья поступила в редакцию 10 февраля 2023 года

Научные достижения сотрудников УГГУ в области поисков и разведки месторождений пьезооптического и жильного кварца

Scientific achievements of USMU employees in the field of searches and exploration of deposits of piezo-optical and vein quartz

Юрий Алексеевич ПОЛЕНОВ*

Уральский государственный горный университет,
Екатеринбург, Россия

*fgg.gl@m.ursmu.ru

Yuriy Alekseevich POLENOV*

Ural State Mining University,
Ekaterinburg, Russia

*fgg.gl@m.ursmu.ru

Аннотация

Исследование месторождений пьезооптического и жильного кварца на Среднем и Южном Урале сотрудниками Уральского государственного горного университета (Свердловского горного института) проходило в два этапа. Период активного внедрения научных достижений Свердловской школы кварцевиков под руководством профессора Г. Н. Вертушкова продолжался более 30 лет – с 1950 по 1980 г. В результате был разработан метод полевых наблюдений и лабораторных исследований жильного кварца, а именно кварце-метрическая съемка, эффективность которой доказана ее использованием в течение 50 лет. Второй период научного изучения кварцевых месторождений протекал с 1992 по 2020 г. Творческий научный коллектив кафедры геологии в составе докторов геолого-минералогических наук В. Н. Сазонова, В. Н. Огородникова, Ю. А. Поленова и кандидата геолого-минералогических наук А. Н. Савичева продолжил детальное изучение золоторудных и кварцевых месторождений. Предметом наиболее пристального внимания авторов стала связь процессов рудообразования с изменяющимися геодинамическими обстановками. Установлено, что многие рудные поля уральских месторождений являются полихронными и полигенными.

Ключевые слова: пьезокварц, жильный кварц, гранулированный кварц.

Abstract

The study of deposits of piezo-optical and vein quartz in the Middle and Southern Urals by employees of the Ural State Mining University (Sverdlovsk Mining Institute) took place in two stages. The period of active introduction of scientific achievements of the Sverdlovsk school of quartzists under the guidance of Professor G. N. Vertushkov lasted more than 30 years – from 1950 to 1980. As a result, a method of field observations and laboratory studies of vein quartz was developed, namely, quartzometric survey, the effectiveness of which was proved by its use for 50 years. The second period of scientific study of quartz deposits proceeded from 1992 to 2020. The creative scientific team of the Department of Geology, consisting of Doctors of Geological and Mineralogical Sciences V. N. Sazonov, V. N. Ogorodnikov, Yu. A. Polenov and Candidate of Geological and Mineralogical Sciences A. N. Savicheva continued a detailed study of gold and quartz deposits. The subject of the closest attention of the authors was the connection between the processes of ore formation and changing geodynamic conditions. It has been established that many ore fields of the Ural deposits are polychronous and polygenic.

Keywords: piezo quartz, vein quartz, granular quartz.

Научные достижения в области поисков и разведки месторождений пьезооптического и жильного кварца на Среднем и Южном Урале, достигнутые сотрудниками Уральского государственного горного университета (Свердловского горного института), осуществлены в два этапа.

1. Свердловская научная школа геологов-кварцевиков

Начало систематического исследования жильного кварца месторождений Среднего и Южного Урала связано с именем доктора геолого-минералогических наук Г. Н. Вертушкова (фото 1). Григорий Николаевич Вертушков (30.01.1909–17.11.1994) – уральский минералог, Почетный член Всероссийского минералогического общества, доктор геолого-минералогических наук (12.06.1948), профессор (1950), заслуженный геолог РСФСР (1972), первооткрыватель Кыштымского месторождения гранулированного кварца (1977), лауреат Государственной премии СССР за промышленное освоение нового вида минерального сырья – гранулированного кварца (1982), заведующий кафедрой минералогии и кристаллографии (1949–1977), профессор-консультант с 1982 по 1992 г. [1].

Со Свердловским горным институтом, кафедрой минералогии связана вся жизнь и деятельность Г. Н. Вертуш-



Фото 1. Доктор геолого-минералогических наук, профессор Г. Н. Вертушков

кова как исследователя и основателя уральской школы прикладной минералогии, организатора высшего геологического образования на Урале.

Исследованию уральского кварца Г. Н. Вертушков посвятил всю свою жизнь. Кандидатская диссертация Г. Н. Вертушкова посвящена жилам альпийского типа на Урале, которые представлялись как основные источники пьезооптического кварца. С 1940 г. Г. Н. Вертушков, уже признанный авторитет в области прикладной минералогии, консультировал Средне-Уральскую экспедицию Гостреста № 13, располагавшуюся в г. Свердловске, которая занималась поисками пьезооптического сырья на Среднем Урале [2].

В 1946 г. Григорий Николаевич успешно защитил докторскую диссертацию «Пьезокварц в кварцевых жилах Среднего и Южного Урала», в которой впервые последовательно изложил свои идеи о метаморфизме жильного кварца.

К концу 1950-х гг. большинство объектов, поставляющих прозрачный жильный кварц, оказались отработанными. Не было открыто и новых месторождений этого вида сырья. В 1956 г. по рекомендации профессора Г. Н. Вертушкова Анатолий Иванович Белковский составил первый проект на проведение геолого-поисковых работ на гранулированный кварц по всей площади Уфалейского гранитного массива. В 1957 г. А. И. Белковским было обследовано несколько участков по восточной периферии массива, в породах свиты «М» было открыто уникальное по размерам поле жил прозрачного гигантозернистого и гранулированного кварца, позднее получившего название Кыштымского [3].

В результате совместной работы коллектива кафедры минералогии Свердловского горного института и геологов экспедиции № 101 в период с 1961 по 1964 г. был разработан метод полевых наблюдений и лабораторных исследований жильного кварца, а именно кварцевметрическая съемка, эффективность которой доказана ее использованием в течение 50 лет [1].

Кварцевметрическая съемка представляет собой комплекс работ, позволяющий выявить типы кварца и установить закономерности их распределения на исследуемой

площади. Кварцевметрическая съемка включает в себя следующие элементы:

- 1) изучение свойств жильного кварца, которые позволяют количественно характеризовать объект исследования;
- 2) выделение и описание типов жильного кварца;
- 3) изучение свойств жильного кварца конкретного геологического региона и отнесение того или иного образца к определенному типу кварца;
- 4) генетическое истолкование результатов.

На рубеже 1950–1960-х гг. в промышленности начал внедряться новый вид природного кварцевого сырья – гранулированный кварц, на много лет определивший пути развития сырьевой базы кварца для плавки прозрачного кварцевого стекла – особо чистого кварца (в современной терминологии – сырьевой источник для высококачественных кварцевых концентратов – НРК). При активном участии профессора Г. Н. Вертушкова открыто, изучено и передано промышленности первое в СССР месторождение гранулированного кварца – нового вида сырья для производства кварцевого стекла.

Серия монографий «Жильный кварц Восточного склона Урала» подводит итоги многолетних исследований «кварцевой школы» профессора Г. Н. Вертушкова на Урале. Наряду с оригинальными методами лабораторных исследований и практическими рекомендациями по бестехнологической оценке кварцевого сырья в статьях и монографиях представлены принципы минералогического картирования – эффективного метода исследования минеральных месторождений [1].

Прочные связи кафедры сложились с производственными организациями Министерства геологии СССР ПО «Уралкварцсамоцветы» и ПО «Казкварцсамоцветы». Выполненные в течение нескольких десятилетий совместные работы привели к созданию самостоятельной отрасли народного хозяйства, которая обеспечила надежную минерально-сырьевую базу для кварцевой промышленности страны [2]. Сотрудники кафедры, принимавшие активное участие в поисках и изучении месторождений кварца, это Г. Н. Вертушков, В. И. Якшин, Ю. А. Соколов, Г. А. Синкевич, О. А. Суставов, А. И. Белковский, Э. Ф. Емлин, В. И. Кайнов, Н. И. Мельникова, Г. Ф. Зверева, Ю. П. Соколин, Н. М. Исакова, В. В. Червяковская, Н. П. Конюхова, В. П. Горячко, Л. И. Позднякова, А. Ф. Вахрушева [1].

В 1982 г. группа сотрудников Свердловского горного института и экспедиции № 101 Мингео СССР стали лауреатами Государственной премии СССР за промышленное освоение нового вида минерального сырья – гранулированного кварца (фото 3).

Период активного внедрения научных достижений Свердловской школы кварцевиков под руководством профессора Г. Н. Вертушкова продолжался более 30 лет – с 1950 по 1980 г. [2].

2. Продолжение исследования жильного кварца месторождений Среднего и Южного Урала

С 1992 г., с распадом СССР, резко упала востребованность промышленности к кварцевому сырью и, как следствие, прекратилось государственное финансирование научного изучения месторождений этого типа.



Фото 2. Доктор геолого-минералогических наук А. И. Белковский



**Фото 3. Лауреаты Государственной премии СССР за промышленное освоение гранулированного кварца – нового вида минерального сырья.
Слева направо: профессора Г. А. Кейльман, Г. Н. Вертушков, В. И. Якшин**

В 1992 г. на кафедре геологии Уральского государственного горного института стали работать преподавателями опытные производственники геологической отрасли, имевшие большой опыт в изучении золоторудных месторождений и месторождений кварцевого сырья, а именно В. Н. Огородников, В. Н. Сазонов, Ю. А. Поленов.

В. Н. Огородников и В. Н. Сазонов сумели создать на кафедре творческий научный коллектив в составе докторов геолого-минералогических наук В. Н. Сазонова, В. Н. Огородникова, Ю. А. Поленова и кандидата геолого-минералогических наук А. Н. Савичева. Творческую работу этого коллектива активно поддерживал академик РАН В. А. Коротеев.

К 1993 г., времени нашей совместной работы на кафедре геологии, В. Н. Сазонов, В. Н. Огородников и автор статьи уже имели определенные научные достижения и большой практический опыт в изучении месторождений, а именно: В. Н. Сазонов – золоторудных, В. Н. Огородников – месторождений метаморфического генезиса, Ю. А. Поленов – месторождений горного хрусталя.

Владимир Николаевич Сазонов (фото 4) в 1954 г. поступил в Свердловский горный институт. Окончив его, стал инженером-геологом и 9 лет посвятил поискам редкометалльных и золоторудных месторождений на Среднем Урале. Здесь он получил опыт практической работы и детальные знания геологии уникального объекта – Березовского золоторудного месторождения и рудного поля. С этим багажом знаний В. Н. Сазонов в 1968 г. стал аспирантом Института геологии и геохимии УНЦ АН СССР. Здесь он прошел путь от аспиранта до заведую-

щего лабораторией, доктора геолого-минералогических наук и профессора. Он обосновал самостоятельность безрезит-лиственитовой формации и охарактеризовал типоморфный для нее зональный комплекс ореолов золота и других элементов. Предметом наиболее пристального внимания В. Н. Сазонова стала связь процессов рудообразования с изменяющимися геодинамическими обстановками [4].

Виталий Николаевич Огородников (фото 5) после окончания в 1969 г. Свердловского горного института был оставлен на кафедре общей и динамической геологии, где под руководством профессора Г. А. Кейльмана занимался изучением метаморфических комплексов Урала и южноуральских месторождений пьезокварца. По материалам изучения этих месторождений он в 1975 г. защитил кандидатскую диссертацию «Алюмокремниевые метасоматиты Кочкарского и Адамовского метаморфических комплексов». Изучая метасоматические образования, сопровождающие хрусталеносные кварцевые жилы, и сравнивая их с метасоматитами золоторудных месторождений, В. Н. Огородников пришел к выводу, что хрусталеносные месторождения формируются пространственно и генетически сопряжены с золоторудной минерализацией. В 1986–1989 гг. были произведены поисково-оценочные работы по прогнозированию золоторудной минерализации на Астафьевском месторождении пьезокварца: «Прогнозная оценка северной части Джабыкского рудного узла», подсчитаны прогнозные ресурсы золота по категории P_2 , P_3 . Эти материалы легли в основу докторской диссертации «Закономерности размещения и условия об-

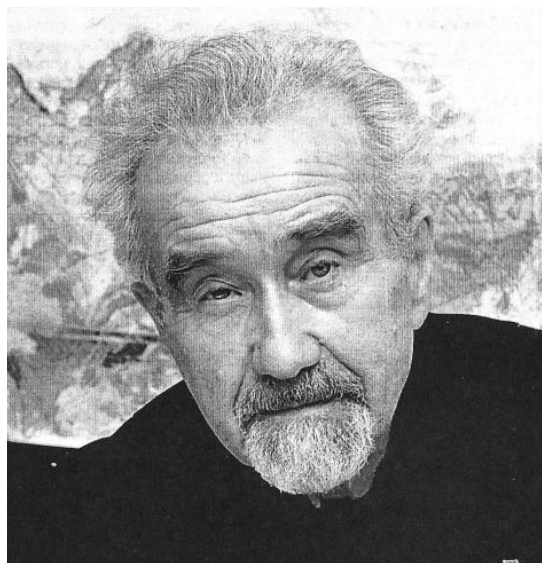


Фото 4. Профессор В. Н. Сазонов



Фото 5. Профессор В. Н. Огородников

разования кварцево-жильных хрусталеносных и золоторудных месторождений Урала» (1993) [4].

Юрий Алексеевич Поленов (фото 6) в 1965 г. окончил Днепропетровский горный институт и получил специальность горного инженера-геолога. По распределению с 1965 по 1991 г. работал в системе Всесоюзного производственного объединения «Союзкварцсамоцветы» Мингео СССР геологом, начальником комплексной геолого-добычной партии, генеральным директором ПО «Казкварцсамоцветы», а затем ПО «Уралкварцсамоцветы». С 1967 по 1972 г. заочно обучался в аспирантуре Ленинградского горного института. Благодаря профессору В. Д. Никитину, доценту В. Ю. Эшкину и профессору С. А. Руденко в 1972 г. защитил кандидатскую диссертацию «Типизация кварцевых жил Светлинского месторождения». В 1973 г. принимал участие в поиске и отработке пьезокварцевых объектов в Сомали, а с 1978 по 1991 г. – месторождений пьезокварца и жильного кварца Казахстана и Урала. С 1992 г. работает в Уральском государственном горном университете – профессор кафедры геологии. Длительное время совмещал работу директора Уральского геологического музея и музея истории университета. В 2009 г. защитил докторскую диссертацию «Эндогенные кварцево-жильные образования коллизионного этапа развития Урала».

Время выполнения научных работ по изучению и исследованию условий формирования золоторудных и кварцево-жильных месторождений Урала, выполненных нашим коллективом в период 1993 по 2020 г., можно условно разделить на три периода.

С распадом СССР возникли экономические сложности в работе высших учебных заведениях. Особенно это отразилось на организации учебных геологических практик для студентов. В. Н. Сазонов предложил пройти по золоторудным объектам Екатеринбургского геологического полигона, многие из которых он изучал, с целью разработки геологических маршрутов учебных практик. С 1993 по 1997 г. в летние периоды наш коллектив с участием В. В. Григорьева детально изучил многие место-

рождения и рудопроявления Екатеринбургского геологического полигона. Мы посетили и внимательно ознакомились с геологией рудных полей Дегтярского, Березовского, Пильненско-Березогорского, Пышминско-Ключевского и месторождений Крылатовского, Шиловского, Свердловского. Так появилась серия обобщающих методических пособий по учебным практикам: «Учебная геологическая практика», 1995 г.; «Золотооруденение Екатеринбургского геологического полигона», 1997 г.; «Шабровский рудный район», 2000 г., «Геологические маршруты по Екатеринбургью», 2001 г.

Для нашей команды проведенные исследования и составление геологических маршрутов послужили значительным уточнением закономерностей локализации золоторудной минерализации и физико-химических условий их образования, а также геологической связи их с формированием кварцево-жильных объектов. Полученные научные сведения о генезисе золоторудных месторождений на примере объектов Екатеринбургского геологического полигона были исследованы на объектах других регионов Урала. В августе 1998 г. наша тройка посвятила полевой период знакомству и изучению месторождений золота Южного Урала. Мы посетили и задокументировали отдельные геологические объекты на месторождениях Карабашское, Каган, Золотая гора, Курасан, Кировское, Кумак, Миндяк, Муртыкты, Светлинское. Собранная научная информация в этот полевой период явилась основой для последующих полевых и лабораторных работ на протяжении 1998–2012 гг. Результаты посещения многих рудопоявлений и проведения фундаментальных разработок по генезису золоторудных месторождений Урала нашим коллективом изложены в монографии объемом 77,5 печ. листов «Месторождения золота Урала», первое издание которой вышло в 1999 г., второе, дополненное, – в 2001 г.

Ю. А. Поленовым и В. Н. Огородниковым научные исследования до совместной работы с В. Н. Сазоновым проводились в основном на объектах месторождений кварцево-жильных образований. Детальное знакомство



Фото 6. Профессор Ю. А. Поленов



**Фото 7. Кандидат геолого-минералогических наук
А. Н. Савичев**

с золоторудными объектами привело нас к выводу, что формирование хрусталеносных месторождений пространственно и генетически сопряжено с золоторудной минерализацией. Научные исследования мы совместно продолжили изучать на месторождениях пьезокварца, горного хрусталя и жильного кварца, уделив этому внимание в период с 2012 по 2020 г.

Были проведены детальные геологические исследования на месторождениях молочно-белого кварца Гора Хрустальная, Светлореченском, Караяновском, Пугачевском; горного хрусталя на Светлинском, Астафьевском, Теренсайском; гранулированного кварца на Маукском, Кыштымском, Кузнечихинском, Вязовском, Аргазинском [2]. В этих исследованиях принял активное участие кандидат геолого-минералогических наук Александр Николаевич Савичев (фото 6).

Предметом наиболее пристального внимания авторов стала связь процессов рудообразования с изменя-

ющимися геодинамическими обстановками. Авторами установлено, что многие рудные поля уральских месторождений являются полихронными и полигенными. Доказан факт неоднократного возобновления процессов концентрации и рассеяния золота в связи с меняющимися геодинамическими обстановками. Показано, что в разное время, в разных геодинамических обстановках в процесс концентрации вовлекалось золото из разных источников: флюидов мантии, растворов, образующихся в связи с магматическими процессами в земной коре, поровых растворов вмещающих пород. Изучая метасоматические образования, сопровождающие хрусталеносные кварцевые жилы, и сравнивая их с метасоматитами золоторудных месторождений мы пришли к выводу, что формирование хрусталеносных месторождений пространственно и генетически сопряжено с золоторудной минерализацией.

Обобщенные результаты научных исследований нашего коллектива изложены в монографиях:

1. Золотооруденение Екатеринбургского геологического полигона / В. Н. Сазонов [и др.]. Екатеринбург: Изд-во УГГГА, 1997. 226 с.
2. Месторождения золота Урала / В. Н. Сазонов [и др.]. Екатеринбург: Изд-во УГГГА, 1999. 570 с.
3. Шабровский рудный район (Средний Урал) / В. Н. Сазонов [и др.]. Екатеринбург: Изд-во УГГГА, 2000. 80 с.
4. Месторождения золота Урала / В. Н. Сазонов [и др.]. Изд. 2-е, испр. и доп. Екатеринбург: Изд-во УГГГА, 2001. 622 с.
5. Сазонов В. Н., Огородников В. Н., Поленов Ю. А. Минерагения шовных зон. Ч. 2. Дегтярско-Карабашская колчеданосная зона (Средний Урал). Екатеринбург: Изд-во УГГГА, 2003. 68 с.
6. Сазонов В. Н., Огородников В. Н., Поленов Ю. А. Минерагения шовных зон. Ч. 1. Кочкарский район (Южный Урал). Екатеринбург: Изд-во УГГГА, 2004. 216 с.
7. Огородников В. Н., Сазонов В. Н., Поленов Ю. А. Минерагения шовных зон. Ч. 3. Уфалейский гнейсо-амфиболитовый комплекс (Южный Урал). Екатеринбург: Изд-во УГГГА, 2007. 187 с.
8. Поленов Ю. А. Эндогенные кварцево-жильные образования Урала. Екатеринбург: Изд-во УГГГА, 2008. 269 с.
9. Минерагения шовных зон Урала / В. А. Коротеев [и др.]. Екатеринбург: УрО РАН, 2010. 416 с.
10. Золоторудная, редкометалльная и хрусталеносная минерализации месторождений Урала кварцево-жильного типа / В. Н. Огородников [и др.]. Екатеринбург: УрО РАН, 2014. 312 с.

11. Поленов Ю. А., Огородников В. Н., Бабенко В. В. Березовское месторождение золота – уникальный объект полихронного и полигенного рудообразования. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2015. 150 с.
12. Гранитные пегматиты, карбонатиты и гидротермалиты Уфалейского метаморфического комплекса / В. Н. Огородников [и др.]. Екатеринбург: УрО РАН, 2016. 273 с.
13. История поисков, разведки и освоения уральских хрусталеносных месторождений (1937–1991) / под ред. Ю. А. Поленова. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2017. 114 с.
14. Гранитные пегматиты и пегматоиды Урала / В. Н. Огородников [и др.]. Екатеринбург: УрО РАН, 2020. 432 с.

За большую работу «Создание научных основ развития рудной минерально-сырьевой базы Урала» в 2003 году большой группе исследователей, куда вошли В. А. Коротеев, В. Н. Сазонов, В. Н. Огородников, была вручена премия Правительства Российской Федерации в области науки и техники.

ЛИТЕРАТУРА

1. Емлин Э. Ф. Очерки истории кафедры минералогии Уральского горного института. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2008. 257 с.
2. История поисков, разведки и освоения уральских хрусталеносных месторождений (1937–1991) / под ред. Ю. А. Поленова. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2017. 114 с.
3. Белковский А. И. Геология и минералогия кварцевых жил Кыштымского месторождения (Средний Урал). Миасс: ИМин УрО РАН, 2011. 234 с.
4. Филатов В. В. Профессора Уральского государственного горного университета: биографический справочник. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2009. 479 с.

Статья поступила в редакцию 01 февраля 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, ctg и т. д.), обозначения химических элементов (Al, Cu, Na и т. д.), некоторые математические термины (lim, ln, arg, grad, const и т. д.), числа или критерии (Re – Рейнольдса и т. д.), названия температурных шкал (°C – градусы Цельсия и т. д.) набираются прямым шрифтом.

4. Физические единицы приводятся в системе СИ.

Графический материал

Рисунки, карты, чертежи предоставляются в электронном и бумажном виде, в цветном и/или черно-белом исполнении. Изображения должны быть четкими, контрастными. Таблицы и схемы должны быть пригодными для правки. Таблицы и схемы, сканированные как изображения, не принимаются.

На картах обязательно указывается масштаб. На чертежах, разрезах, картах должно быть отражено минимальное количество буквенных и цифровых обозначений, а их объяснение – в подрисуночных подписях. Ксерокопии и сканированные ксерокопии фотографий не принимаются. Рисунки с нечитаемыми или плохо читаемыми надписями, с подписями «от руки», слишком тонкими линиями не принимаются.

Подрисуночная подпись должна быть набрана 8 кеглем, основной текст в таблице – 8 кеглем, шапка таблицы – 8 кеглем. Гарнитура текста в рисунках и таблицах – Arial, кегль 8.

Все статьи подлежат двойному слепому рецензированию, мнение рецензента всегда доводится до сведения автора.

Примеры оформления списка литературы

Монографии

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.

На обложке: фото калугинита – водного фосфата кальция, марганца и магния
On the cover: on photo kaluginite – aqueous calcium, manganese and magnesium phosphate

Редакция выражает благодарность за помощь в работе журнала

Бараникову Александру Григорьевичу – д-ру геол.-минерал. наук, профессору (Екатеринбург, Россия);
Карстен Луизе – Dr. rer. nat. (Ганновер, Германия);
Кожушко Герману Георгиевичу – д-ру техн. наук, профессору (Екатеринбург, Россия);
Козину Владимиру Зиновьевичу – д-ру техн. наук, профессору (Екатеринбург, Россия);
Корнилкову Сергею Викторовичу – д-ру техн. наук, профессору (Екатеринбург, Россия);
Сурневу Виктору Борисовичу – д-ру физ.-мат. наук, профессору (Екатеринбург, Россия);
Филиппову Сергею – Dr. rer. nat. (Ганновер, Германия);
Хальфину Марату Нурмухамедовичу – д-ру техн. наук, профессору (Новочеркасск, Россия)

Редакция

Главный редактор Косарев Н. П.
Заместитель главного редактора Шорин А. Г.
Ответственный секретарь Георгиева Н. В.
Редактор Парамонова Л. Ю.
Дизайнер Васфилова И. С.
Переводчик Тараньжин Б. С.

Верстка Швецово́й Ю. Б.
Корре́ктура, оформле́ние рисунков Пихтовниково́й О. Г.

Подписано в печать 13.03.2023 г. Дата выхода в свет – 15.03.2023 г.
Формат 60 × 84/8. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 21,27. Тираж 120 экз. Заказ № 22
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



Читайте в этом номере статью А.Г. Шорина, Ю.В. Ерохина, С.Ю. Кропанцева
«Александр Васильевич Калугин(1857-1933) и бывший калугинит (ныне
джансит – $(CaMnMg)$)»



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 (69), 2023 г.