NEWS

of the Ural State Mining University



ИЗВЕСТИЯ

Уральского государственного горного университета

> ISSN 2307-2091 (PRINT) ISSN 2500-2414 (ONLINE)



Выпуск 4 (52), 2018 г.

Уральский государственный горный университет

Известия Уральского государственного горного университета 2018, вып. 4(52)

Ural State Mining University

News of the Ural State Mining University 2018, issue 4(52)

















Журнал выходит 4 раза в год

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

К публикации принимаются статьи на русском и английском языках.

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

Published 4 times a year

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

We accept for publication articles in Russian and English languages.

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

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

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

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

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-55055 от 14.08.2013

Учредитель и издатель

УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Главный редактор

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

Заместитель главного редактора

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

Ученый секретарь

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

Редакционная коллегия

МАКАРОВ А. Б. – д-р геол.-минерал. наук, проф., Уральский государственный горный университет, *Екатеринбург, Россия* (Науки о Земле) **ДАВЫДОВ В. А.** – канд. геол.-минерал. наук, ст. науч. сотр., Институт геофизики имени Ю. П. Булашевича УрО РАН, *Екатеринбург,* Россия (Науки о Земле)

ДАШКО Р. Э. – д-р геол.-минерал. наук, проф., Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия (Науки о Земле) ДУШИН В. А. – д-р геол.-минерал. наук, проф., Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия (Науки о Земле) ЕРОХИН Ю. В. – канд. геол.-минерал. наук, Институт геологии и геохимии им. А. Н. Заварицкого УрО РАН, Екатеринбург, Россия (Науки о Земле) ИВАНОВ К. С. – д-р геол.-минерал. наук, Институт геологии и геохимии им. А. Н. Заварицкого УрО РАН, *Екатеринбург, Россия* (Науки о Земле) ИГОЛКИНА Г. В. – д-р геол.-минерал. наук, Институт геофизики им. Ю. П. Булашевича УрО РАН, *Екатеринбург, Россия* (Науки о Земле) КОРОТЕЕВ В. А. – академик РАН, д-р геол.-минерал. наук, проф., Институт геологии и геохимии имени А. Н. Заварицкого УрО РАН, Екатеринбург, Россия (Науки о Земле)

МАЛИЧ К. Н. – канд. геол.-минерал. наук, Институт геологии и геохимии им. А. Н. Заварицкого УрО РАН, *Екатеринбург, Россия* (Науки о

НАУМОВ В. А. – д-р геол.-минерал. наук, доц., Пермский государственный национальный исследовательский университет, *Пермь, Рос*сия (Науки о Земле)

писецкий В. Б. – д-р геол.-минерал. наук, проф., Уральский государственный горный университет, *Екатеринбура, Россия* (Науки о Земле) ПУЧКОВ В. Н. – член-корр. РАН, д-р геол.-минерал. наук, Институт геологии Уфимского научного центра РАН, Уфа, Россия (Науки о Земле) РИХВАНОВ Л. П. – д-р геол.-минерал. наук, проф., Национальный исследовательский Томский политехнический университет, *Томск*, Россия (Науки о Земле)

СУНГАТУЛЛИН Р. Х. – д-р геол.-минерал. наук, доц., Казанский (Приволжский) федеральный университет, *Казань, Россия* (Науки о Земле) **ХОМЕНКО В. П.** – д-р геол.-минерал. наук, проф., Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, *Москва, Россия* (Науки о Земле)

ЩАПОВ В. А. – д-р геол.-минерал. наук, ст. науч. сотр., Институт геофизики им. Ю. П. Булашевича УрО РАН, *Екатеринбург, Россия* (Науки о Земле) **ЖАБКО А. В.** –

канд. техн. наук, доц., Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия (Технические науки; Науки о Земле)

ВАЛИЕВ Н. Г. – д-р техн. наук, проф., первый проректор, Уральский государственный горный университет, *Екатеринбург, Россия* (Технические науки; Науки о Земле)

ТОЛИК В. И. – д-р техн. наук, проф., Северо-Кавказский горно-металлургический институт, *Владикавказ, Россия* (Технические науки) ЗОТОВ А. Н. – д-р техн. наук, проф., Уфимский государственный нефтяной технический университет, *Уфа, Россия* (Технические науки) ПОТАПОВ В. Я. – д-р техн. наук, доц., Уральский государственный горный университет, *Екатеринбура, Россия* (Технические науки) ИГНАТЬЕВА М. Н. – д-р экон. наук, проф., Уральский государственный горный университет, *Екатеринбура, Россия* (Экономические науки) ГЛАЗЫРИНА И. П. – д-р экон. наук, канд. физ.-мат. наук, Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, *Чита, Россия* (Экономические науки)

ДОРОШЕНКО Ю. А. – Д-р экон. наук, проф., Белгородский государственный технологический университет имени В. Г. Шухова, *Белгород*, Россия (Экономические науки)

ДУШИН`А. В. – д-р экон. наук,́ ректор, Уральский государственный горный университет, *Екатеринбург, Россия* (Экономические науки) ЛАРИЧКИН Ф. Д. — д-р экон. наук, гл. науч. сотр., Институт экономических проблем им. Г. П. Лузина Кольского научного центра РАН, Апатиты, Мурманская обл., Россия (Экономические науки) НАЗАРОВА 3. М. — д-р экон. наук, проф., Российский государственный геологоразведочный университет имени С. Орджоникидзе, Мо-

сква, Россия (Экономические науки)

Члены международной редколлегии

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

Известия Уральского государственного горного университета. 2018, вып. 4(52) News of the Ural State Mining University. 2018, issue 4(52)

Founder and publisher

URAL STATE MINING UNIVERSITY

Editor-in-Chief

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

Deputy Editor-in-Chief

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

Academic Secretary

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

Editorial board

A. B. MAKAROV, Dr, Prof., Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia (Earth sciences)
 V. A. DAVYDOV, PhD, Institute of Geophysics, Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia (Earth sciences)

R. A. DASHKO, Dr, Prof., Saint-Peterburg Mining University, Saint Petersburg, Russia (Earth sciences)

V. A. DUSHIN, Dr. Prof., Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia (Earth sciences)

Yu. V. EROKHIN, PhD. Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia (Earth sciences)

K. S. IVANOV, Dr. Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia (Earth sciences)

G. V. IGOLKÍNA, Dr. Prof., Ekaterinburg, Russia, Institute of Geophysics, Ural Branch of Russian Academy of Sciences (Earth sciences)

V. A. KOROTEEV, Academician of the RAS, Dr. Professor, Ekaterinburg, Russia, Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch of Russian Academy of Sciences (Earth sciences)

K. N. MALITCH, PhD, Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia (Earth sciences)

V. A. NAUMOV, Dr. Assoc. Prof., Perm State University, Perm', Russia (Earth sciences)

V. B. PISETSKI, Dr, Prof., Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia (Earth sciences)

V. N. PUCHKOY, Corresponding member of the RAS. Dr. Institute of Geology, Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Ufa, Russia (Earth sciences)

L. P. RIKHVANOV, Dr., Prof., Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia (Earth sciences)

R. Kh. SUNGATULLIN, Dr. Assoc. Prof., Kazan Federal University, Kazan', Russia (Earth sciences)

V. P. KHOMENKO, Dr, Prof., Moscow State University of Civil Engineering, *Moscow, Russia* (Earth sciences)
V. A. SHCHAPOV, Dr, Prof., Institute of Geophysics, Ural Branch of Russian Academy of Sciences, *Ekaterinburg, Russia* (Earth sciences)

A. V. ZHABKO, PhD, Assoc. Prof., Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia (Engineering sciences; Earth sciences)

N. G. VALIEV, Dr. Prof., First Vice-Rector, Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia (Engineering sciences; Earth sciences)

V. I. GOLIK, Dr., Prof., North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy, State Technological University, Vladikavkaz, Russia (Engineering sciences)

V. Ya. POTAPOV, Dr, Prof., Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia (Engineering sciences)

A. N. ZOTOV, Dr. Prof., Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia (Engineering sciences)

M. N. IGNAT'EVA, Dr. Prof., Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia (Economic sciences)

I. P. GLAZYRINA, Dr. Prof., Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology of the Siberian Branch of the RAS, Chita, Russia (Economic sciences)

Yu. A. DOROSHENKO, Dr, Prof., Belgorod State Technological University named after B. G. Shukhov, Belgorod, Russia (Economic sciences)

A. V. DUSHIN, Dr, Rector, Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia (Economic sciences)

F. D. LARICHKIN, Dr, Luzin Institute for Economic Studies – Subdivision of the Federal Research Centre «Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences», *Apatity, Murmansk region, Russia* (Economic sciences)

Z. M. NAZAROVA, Dr. Prof., Russian State Geological Prospecting University named after Sergo Ordzhonikidze, Moscow, Russia (Economic sciences)

International members

A. E. ABDEL GAWAD, Dr, Nuclear Materials Authority, Cairo, Egypt (Earth sciences)

R. K. W. MERKLE, Dr. Prof., University of Pretoria, Pretoria, South Africa (Earth sciences)

I. A. SADOVENKO, Dr, Prof., National Mining University, Dnepr, Ukraine (Earth sciences; Engineering sciences)

X. N. BUI, Dr.-Ing., Assoc Prof., Vice Rector, Hanoi University of Mining and Geology, Hanoi, Vietnam (Engineering sciences)

Ju. A. VEKSLER, Dr.-Ing.habil, Prof., Marco Systemanalyse und Entwicklung GlbH, Dachau, Germany (Engineering sciences)

C. DREBENSTEDT, Prof., Dr.-Ing., Technical University Bergakademie, Freiberg, Germany (Engineering sciences) N. ILIAS - Dr. Prof., Universitatea din Petrosani, Petrosani, Romania (Engineering sciences)

V. S. MORKUN, Dr. Prof., Vice-Rector for scientific work, Kryvyi Rih National University, Krivoy Rog, Ukraine (Engineering sciences) R. F. SACHSENHOFER, Mag.rer.nat., Dr.mont., Univ.-Professor, University of Leoben, Leoben, Austria (Engineering sciences)

A.-M. FERRERO, PhD, University of Turin, Turin, Italy (Engineering sciences)

A. F. VERSHKOV, Dr, Prof., Geology Department in Uranium Exploration Company «Volkovgeologiia», Almaty, Kazakhstan (Earth sciences; Economic sciences)

F. XIAO, PhD, Prof., Heilongjiang University of Science and Technology, Harbin, China (Engineering sciences; Earth sciences)

T. T. TAMBOVCEVA, Dr. Assoc Prof., Riga Technical University, Riga, Latvia (Economic sciences)

E. C. RADA, Dr, Prof., Insubria University, Varese, Italy (Economic sciences)

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

Структурная эволюция района Вади роуд Эль-Саялла, Восточная пустыня (Египет) К. Г. Али, Х. А. Элива, С. М. Масуд, М. Мурата, А. Г. Абледь Гавал

A. E. Абдель Гавад, (In English)

Контроль за продвижением теплового потока в процессе разработки нефтяных месторождений с применением термической обработки

Б. А. Багиров, А. М. Гаджиев (In English)

Акцессорный циркон из гранитных пегматитов северо-восточной части Адуйского массива (химический состав и датирование)

В. В. Хиллер, Ю. В. Ерохин **(In English)**

(In English)

К. С. Иванов

Окислительно-восстановительное состояние хромититов Ямботывисской площади Войкаро-Сыньинского массива (Полярный Урал) П. Б. Ширяев, Н. В. Вахрушева

О возможной максимальной глубине нахождения месторождений нефти

Количественная оценка цвета камней с аллохроматической окраской Р. Н. Зубов

Методологические основы оценки фильтрационно-емкостных свойств продуктивного горизонта при эксплуатации его горизонтальными скважинами С. В. Аббасова

Использование метода георадиолокации для исследований древнего медного рудника «Воровская яма» на Южном Урале В. В. Носкевич, Н. В. Федорова

Техногенные трансформации гидрогеосферы Кыргызской Республики Л. Э. Оролбаева

EARTH SCIENCES

7 Structural evolution of Wadi Road El-Sayalla area, Eastern Desert, Egypt

K. G. Ali, H. A. Eliwa, S. M. Masoud, M. Murata, A. E. Abdel Gawad (In English)

18 Control of movement of heat front during oil reservoir with thermal treatment
B. A. Bagirov, A. M. Hajiyev (In English)

The chemical composition and dating of accessory zircon from granitic pegmatites in the north-eastern part of the Aduisky massif V. V. Khiller, Yu. V. Erokhin (In English)

The redox state of chromitites from the Yambotyvissky area (Voikar-Syninsky massif, Polar Urals)
P. B. Shiryaev, N. V. Vakhrusheva (In English)

41 About possible maximum depth of oil deposits
K. S. Ivanov

50 Quantitative evaluation of the colour of gem stones with allochromatic colour
R. N. Zubov

57 Methodological fundamentals of the evaluation of porosity and permeability properties of production horizon when using horizontal wells S. V. Abbasova

61 Using the ground penetrating radar method for research of the ancient "Vorovskaya Yama" copper mine in the South Ural V. V. Noskevich, N. V. Fedorova

68 Technogenic transformations of the hydrogeosphere of the Kyrgyz Republic
L. E. Orolbaeva

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Математическое моделирование совместной работы группы виброизоляторов с квазинулевой жесткостью

А. Р. Валеев, А. Н. Зотов, М. М. Галиуллин, Т. А. Янбарисов (In English)

Оценка влияния взрывных работ на устойчивость спаренных тоннелей Т. М. Чан, С. Н. Буй, К. Х. Чан, К. Х. Нгуен, В. И. Голик

ENGINEERING SCIENCES

74 Mathematical simulation of joint work of a vibration isolator group with quasi-zero stiffness

A. R. Valeev, A. N. Zotov, M. M. Galiullin, T. A. Yanbarisov (In English)

84 Evaluation of influence of blasting workings on the stability of double tunnels

T. M. Tran, X. N. Bui, Q. H. Tran, Q. H. Nguyen, V. I. Golik

Взаимодействие главных механизмов карьерного 93 Interaction of the main mechanisms of a mine экскаватора при экскавации горных пород

А. П. Комиссаров, Ю. А. Лагунова, Н. С. Плотников, О. А. Лукашук, В. И. Саитов

excavator while shovelling rocks

A. P. Komissarov, Yu. A. Lagunova, N. S. Plotnikov, O. A. Lukashuk, V. I. Saitov

Фундаментальные проблемы практической 98 геомеханики и возможные пути их преодоления А. В. Жабко

Underlying problems of practical geomechanics and possible ways to overcome them A. V. Zhabko

Способ борьбы с твердой фазой шахтных вод 108 The method of fighting with the solid phase путем полезного использования избыточной напорности насосного оборудования

of mine waters by the beneficial use of excessive pressure pumping equipment

Н. П. Овчинников N. P. Ovchinnikov

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

ECONOMIC SCIENCES

заброшенных медноколчеданных рудников Урала

С. С. Карагодин, В. С. Карагодин, Ю. П. Морозов, И. В. Заузолков

K вопросу о перспективах (второй жизни) 114 To the question about prospects (upcycle) of abandoned copper-sulphide pits in the Urals S. S. Karagodin, V. S. Karagodin,

Yu. P. Morozov, I. V. Zauzolkov

Модель устойчивого развития: 122 условия реализации

О. В. Косолапов, В. Е. Стровский

Model of sustainable development: conditions for its implementation

O. V. Kosolapov, V. E. Strovskiy

Парадоксы приграничного туризма 127 на востоке России

И. П. Глазырина, А. Е. Пешков

Discrepancies of border tourism in the east of Russia

I. P. Glazvrina, A. E. Peshkov

Вопросы создания инновационной мотивационной 135 среды в системе профессионального образования

К. В. Рочев, С. А. Полищук, Д. С. Марченко

Questions on creating an innovative motivational environment in the vocational training system K. V. Rochev, S. A. Polishchuk, D. S. Marchenko

по уровню финансовой обеспеченности

Е. А. Захарчук, П. С. Трифонова

Дифференциация арктических территорий 143 Differentiation of the Arctic territories by the level of financial security

E. A. Zakharcuk, P. S. Trifonova

ИСТОРИЯ ГОРНОГО ДЕЛА

HISTORY OF MINING

Анатолий Филиппович Бушмакин 152 Anatoly Filippovich Bushmakin (1947-1999) и бушмакинит

(1947–1999) and Bushmakinite Д. А. Клейменов, В. И. Кайнов D. A. Kleimenov, V. I. Kainov

в деле»: естествоиспытание, эксперимент, научный поиск, самоопределение П. С. Козлов, И. В. Козлова, Р. Р. Ленцевич

Геомузейная педагогика – уральская «живинка 158 Geomuseum pedagogy – Ural "creativity in labor of love": natural philosophy, experiment, scientific search, self-determination

P. S. Kozlov, I. V. Kozlova, R. R. Lentsevich

Hayки o Земле Earth sciences

УДК 551.243(620)

https://doi.org/10.21440/2307-2091-2018-4-7-17

Structural evolution of Wadi Road El-Sayalla area, Eastern Desert, Egypt

Khaled Gamal ALI¹, Hassan Ali ELIWA², Masoud Salah MASOUD¹, Mamoru MURATA³, Ahmed El Sayed ABDEL GAWAD¹

¹Nuclear Materials Authority, Cairo, Egypt

²Minoufiya University, Cairo, Egypt

³Naruto University of Education, National University Corporation, Naruto, Japan

Wadi Road El-Sayalla area is a part of the south Eastern Desert of Egypt. It comprises two plutons, Nikeiba basement rock complexes and Fileita Nubian sandstone. It is composed of metavolcanics, syenogranite, alkali feldspar granite and quartz syenite intruded by felsite and dolerite dikes and quartz veins at Nikeiba plutons which non-conformable overlain by Nubian sandstones at Fileita area.

Purpose of the work. The present work of this paper is to elucidate the interaction between inherited ductile fabrics and overprinting brittle structures. It is important to reconstruct the tectonic evolution of Wadi Road El-Sayalla area which help in constraining the mineralization trends in the study area. **Research methods.** The folding related to ductile structures were analyzed using stereographic projection software packages GE Orient version 9.4.5. The fracture analyses related to brittle structures were carried out quantitatively using the paleostress analyses of the different sets to calculate the tensors related to the different compressional and extensional events using Tensor program.

Results. Structural evolution in the investigated area enabled the separation of five structural episodes: E1: syn-tectonic granite (tonalite-granodiorite); folding-thrusting episode associated with the cratonization of the arc/inter-arc rocks association. E2: Late-tectonic granite; upright folding episode associated with compression and shortening to the NE-SW direction. E3: Post-tectonic granite intrusion episode produced syenogranite and alkali feldspar granite of Nikeiba. E4 and E5: Early Cretaceous to Post Pleistocene episode is manifested by syncline folding along ENE-WSW detected in the Nubian sandstone of Fileita (E4). On the other hand, E5: Fracturing, faulting episode is characterized by multi-trends of fault populations (E-W strike slip (right; oldest), N-S strike slip (left), E-W dip slip, NE-SW strike slip (right) and NE-SW dip slip (youngest). Accessories as thorite, uranothorite, monazite, zircon, allanite, yttrocolombite and fluorite appear to be structurally controlled by the interaction between inherited ductile fabrics and overprinting brittle structures. The NE-SW, NW-SE, E-W, NNW-SSE and N-S normal faults are considered to be important deep seated structure trends which controlled many injections of felsite and dolerite dikes and alteration features that could have acted as good pathways for mineralization.

Keywords: Wadi Road El-Sayalla, Nikeiba, Fileita, Egypt, folding-thrusting, cratonization, folding episode, faulting episode.

■ ntroduction

The studied area is a part of the basement complex in the Eastern Desert of Egypt; passed through several structural events since the early cratonization episode of the arc-inter-arc associations. So, the structural analyses of it enabled the separation of successive structural events including ductile and brittle deformations.

Many researchers have extensively studied structure evolution of the basement complexes and associated rocks in the Eastern desert of Egypt [1–7].

The structural field measurements were carried out on scattered pattern making use of the wadis in the area. They include primary structure measurements as bedding, secondary structures like foliation, deformed pebbles, faults, joints, minor and meso-scale folds. All the measurements were analyzed using different proper techniques "GE Orient version 9.4.5 and Tensor program according to [8–10]" to characterize the different structure that affected the area through out its geologic history.

Geologic setting

The exposed rock types at Wadi Road El-Sayalla are located between Latitudes 23°44'18"–23°54'36" N and longitudes 34°10'48"–34°24'36" E, in the Eastern Desert of Egypt (Fig. 1). Field studies indicate the presence of metavolcanics, tonalite-granodiorite, syenogranite, alkali feldspar granite and quartz syenite non-comfortably overlain by Nubian sandstone. Metavolcanics form a thick sequence of stratified lava flows interbanded with their pyroclastics. They are represented by ash and lithic lapilli metatuffs of basaltic, andesitic and dacitic composition. These rocks are intruded by tonalite-granodiorite, syenogranite, alkali feldspar granite and quartz syenite as well as by felsite dikes and quartz veins. Tonalite-granodiorite forms low relief masses and is non-comfortably overlain by Nubian sandstones at Fileita area. Tonalite-granodiorite consists of plagioclase, K-feldspar, quartz, hornblende and biotite. Syenogranite is low to moderate relief and is composed of K-feldspar, quartz, biotite, plagioclase and iron oxides. Alkali feldspar granite is the last phase at Nikeiba plutons. It is characterized by moderate relief and is composed of K-feldspar, plagioclase, quartz, and biotite. Quartz syenite forms high relief hills and is composed of K-feldspar, quartz, plagioclase, amphibole and biotite. Syenogranite and quartz syenite are highly albitized, hematitized and kaolinitized. Syenogranite, alkali feldspar granite and quartz syenite intrude the metavolcanics with well exposed intrusive contact. Felsite dikes cut the syenogranite, alkali feldspar granite and quartz syenite in the northeastern part of the mapped area. They are brecciated along the contact with metavolcanics and syenogranite. They are composed essentially of K-feldspar quartz and plagioclase together with subordinate biotite.

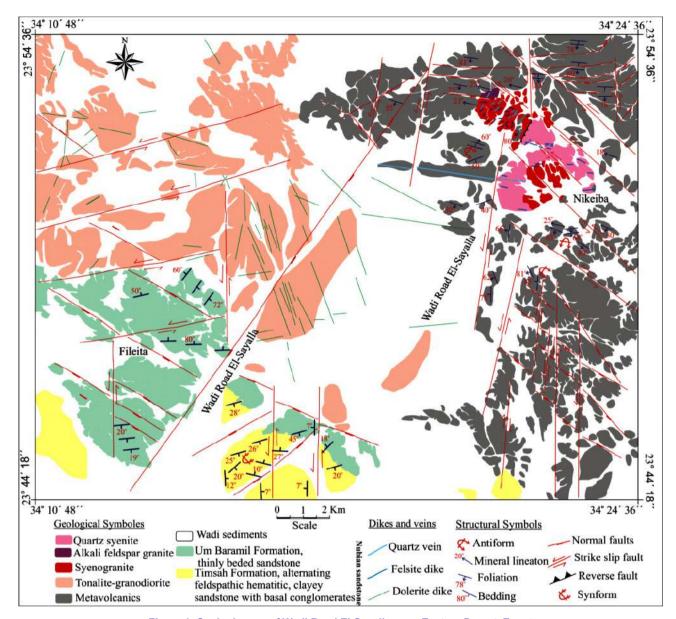


Figure 1. Geologic map of Wadi Road El-Sayalla area, Eastern Desert, Egypt. Рисунок 1. Геологическая карта района Вади-роуд Эль-Саялла, Восточная пустыня (Египет).

Nubian sandstones include two Formations: lower Timsah Formation and upper Um Baramil Formation (Fig. 2). Timsah Formation attains 7.5 m thick, and comprises different types of cross-bedding, pebbly ferruginous, gradded bedding and clayey sandstones. Gradded- and cross-bedding features are observed as primary sedimentary structure in some sandstone beds. Um Baramil Formation is the most extensive exposure of Nubian sandstone in the investigated Fileita area. It overlies Timsah Formation and in other parts overlies the tonalite-granodiorite with non-conformity surface. This formation attains 70 m in thickness and comprises yellowish to dark grey sandstone, kaolinitic sandstone and pebbly ferruginous sandstone. Timsah and Um Baramil formations are traversed by N-S strike slip sinstral faults (Fig. 1).

Structural analyses

The studied area is an object of an intensive detailed systematic analysis of the structural fabrics (bedding, foliation, fold axes, fault populations, joints and liniments) collected from different sites distributed all the outcropping rock types (Fig. 1). During the detailed field study, the chronological criteria (cross-cut relationships, overprinting relations, overprinting of marks, reactivation geometries as well as fold-fault relationships) have been carefully documented in order to define the succession of the deformational events. A fundamental concept in structural analysis is the proposition that the small-scale structures in the field can act as a guide to the large-scale regional features that are not visible to the field observer.

Ductile fabrics

Field observations indicate that the ductile deformation was restricted only to highly sheared metavolcanics as regional isoclinal and upright folds with pervasive NW-SE and ENE-WSW foliations. Ductile deformation is studied by analyzing the measured structural elements represented by foliations and minor fold axes, using the lower hemisphere stereographic projection. Based on measurements of foliation, lineaments and fold axes have been collected from different sites distributed along the metavolcanics exposures. These measurements have been categorized and analyzed according to its trend distribution. Each system of foliation has been analyzed to deduce its principal compression direction as well as their corresponding inferred tectonic regime.

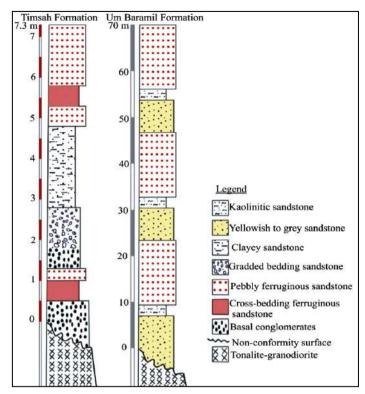


Figure 2. Schematic lithological profiles show the nonconformity surface between tonalite-granodiorite and Nubian sandstone successions in Timsah Formation (7.3 m) and Um Baramil Formation (70 m) at Wadi Road El-Sayalla (Fileita area), Eastern Desert, Egypt. Рисунок 2. Схематические литологические профили показывают несогласие между тоналит-гранодиоритами и нубийскими песчаниками в Тимсахской свите (7,3 м) и Ум-Барамильской свите (70 м) на Вади-роуд Эль-Саялла (район Филейты), Восточная пустыня (Египет).

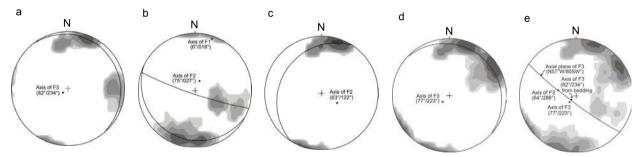


Figure 3. Stereograms of mesoscopic structural data for Wadi Road El-Sayalla metavolcanics rocks, Eastern Desert, Egypt. All stereograms are Schmidt net equal-area lower hemisphere projection. a – density contour of the poles to the bedding planes, contours at 4, 8, 16 and 32% for 32 bedding; b – density contour of the poles to the foliation from the NW and N limbs of a regional F1 and F2 isoclinal antiform, contours at 2, 4, 8 and 16% for 34 foliations; c – density contour of the poles to the foliation from the south limb of a regional F2 isoclinal antiform, contours at 3, 6, 12, 24 and 48% for 32 foliations; d – density contour of the poles to the foliation from the S and SW limbs of a regional F3 upright fold, contours at 1, 2, 4, 8 and 16% for 75 foliations; e – the great circle of best fit for F3 hinges gives an estimate of the orientation of the F3 axial plane, contours at 1, 2, 4, 8 and 16% for 109 foliations.

Рисунок 3. Стереограммы мезоскопических структурных данных для метавулканических пород из Вади-роуд Эль-Саялла, Восточная пустыня, Египет. Все стереограммы – это проекция, сохраняющая равенство площадей нижней полусферы Шмидта. а) контур плотности полюсов к плоскостям напластования, контуры 4, 8, 16 и 32% для 32 наслоений; б) контур плотности полюсов к сланцеватости из NW и N крыльев складки региональной и изоклинальной антиформы (F1 и F2), контуры 2, 4, 8 и 16 % для 34 наслоений. в) Контур плотности полюсов к сланцеватости с южного крыла складки региональной изоклинальной антиформы F2, контуры 3, 6, 12, 24 и 48 % для 32 наслоений. г) Контур плотности полюсов к сланцеватости S и SW крыльев региональной вертикальной складки F3, контуры 1, 2, 4, 8 и 16 % для 75 наслоений. д) Большой круг, наиболее подходящий для перегиба F3, дает оценку ориентации осевой плоскости F3, контуры на 1, 2, 4, 8 и 16 % для 109 наслоений.

Bedding

Bedding planes are locally preserved in the metavolcanics and measured whenever possible; they are frequently transposed by foliation and later deformation. So, the earlier ductile deformation episode can depict from the foliation. Bedding surfaces in the metavolcanics strike NW-SE and dipping generally range between 50° to 80° SW. On the lower hemisphere equal area has graphical analysis; (Fig. 3, a) indicates a great circle with fold axis plunging (82°/N-234°). This fold trend represents the third folding generation F3.

Foliation

Foliations are more extensive, parallel in finer and softer beds than in harder beds and bands of the metavolcanics especially in the more felsic metavolcanics. Foliation planes resulted from deformation which flattened the embedded clasts. One distinctive

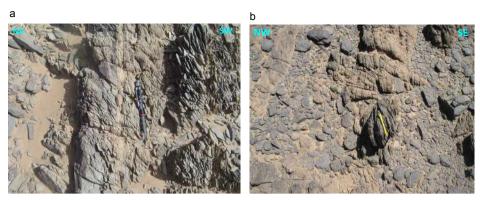


Figure 4. Effect of ductile deformation on metavolcanics. a – bedding and foliation have minor angle between each other in metavolcanics; b – banded metatuffs associating more massive basaltic shear pod.

Рисунок 4. Влияние пластической деформации на метавулканиты. а – слоистость и сланцеватость в метавулканитах разноориентированы между собой на небольшой угол; б) полосчатые метатуфы ассоциируют с разрезом более массивных базальтов.

set of cleavage is observed; it is either pervasive or penetrative and affects metavolcanics and tonalite-granodiorite along their contact. The foliations are approximately parallel to the axial surface of regional folds and are considered as an axial plane foliation representing the early folds in the area, associated with the early folding-thrusting episode [6, 11, 12]. The metavolcanics possess a strong bedding planes parallel cleavage to the foliations in some sites, have a minor angle between each other (Fig. 4, a) and others were perpendicular to the bedding planes which related to that they are located on the hinge of the fold. These bedding enclose the more massive basaltic shear pods (~30 cm long, 20 cm width) banded and ranged in thickness from (1 cm to 10 cm) (Fig. 4, b).

Folding analyses

Based on the geometric analysis of folding, three generations are distinguished F1, F2 and F3. Foliation planes are plotted on the lower hemisphere equal area projection to deduce the principal compression direction affected the metavolcanics. On the N and S limbs of F2 fold (Fig. 3, b, c), the data show bimodality of two subparallel great circles reflecting the deformation of the two limbs of an isoclinal tight fold (two limbs of F1). The elongation of pole concentrations is the result of later gentle refolding of the F1 fold limbs about F3 axial plane. The calculated F1 axis is 6°/ 018° (Fig. 3, b).

The plot of foliation poles for the N and S limbs of F2 fold; it does not show the same bimodality as the other limb due to the tightness of F1 folds on that limbs. The elongation of the polar concentration is again due to open F3 folding. The F2 axes as $75^{\circ}/027^{\circ}$ and $63^{\circ}/122^{\circ}$ (Fig. 3, b, c). The F2 fold is nearly coaxial with the F1 folds indicating that the compression during this episode (E1) continued in the same direction.

The great circle of best fit for the calculated F3 axes from bedding in metavolcanics 82°/ 234° (Fig. 3, a), and hinges of the F3 upright fold 77°/ 223° and 64°/ 286° (Fig. 3, d, e) are shown in (Fig. 3, e). This great circle defines the mean axial plane of F3 folds for the study area. Its attitude is N57°W/ 80°SW. The F3 folding is occurred by intracratonic compression episode (E2), which acted in a general NE-SW trend. The compression and shortening trend during E2 is to the NE-SW direction, i.e., quite different from the NW-SE shortening direction during E1. This means that crustal shortening directions flipped through about 90°.

The age of E1 episode can be estimated to be between the formation of the arc-inter-arc rock association and the intrusions of the syntectonic granites. These granites have an age (660–730 Ma) [13]. They are considered as emplaced at the culmination of the low angle shearing tectonic event.

The fourth folding generation F4 is manifested by syncline folding that existed in Nubian sandstone at Fileita area (Fig. 5, a, b). Bedding planes are plotted on an equal area projection to show the trend and dip of the regional fold axis F4 plunging (12°/N-83°) along the axial plane (N84°E/84°S) that existed after the intrusion of younger granites and the deposition of Nubian sandstone Post-Cretaceous.

Brittle deformation and paleostress analyses

Tectonic analyses based on the aeromagnetic survey data

Wadi Kharit/Wadi Jararah basin may be explained in terms of a pull a part wrench with right-lateral motion (Fig. 6). In pre-Jurassic time, the main trend of the basement rocks was composed mainly of NW-SE system. Tectonic analyses explain the geometric configuration and orientation of a pull a part movement which governed the sedimentation history of the area; the platform regime began in Paleozoic through northern Africa [14].

A rose diagram (Fig. 6) represents the main faults trends from an aeromagnetic map. The main trends of normal faults are NW-SE to NNW-SSE with minor trends NE-SW, E-W and N-S. On the other hand, strike slip faults have NE-SW and NNE-SSW trends. These trends can be considered as deep seated trends in the study area. From the present study; alteration processes including albitization, hematization, kaolinitization and dissilicification affecting syenogranite, alkali feldspar granite and quartz syenite are mainly associated with the NW-SE to NNW-SSE, NE-SW, E-W and N-S deep seated normal fault trends. This means that the deep seated trends from an aeromagnetic map of normal faults are the same trends of different types of alterations delineated the granitoids at Wadi Road El-Sayalla area.

Paleostress analyses

The (INVD) direct inversion [8–10, 16] used to determine paleostress tensors from fault-slip data sets. This method is based on some hypotheses which can be verified on the basis of data consistency after computations and geological observation at data collection sites: 1) The stress field was homogeneous within the site studied for the tectonic event considered. 2) Slip occurred in

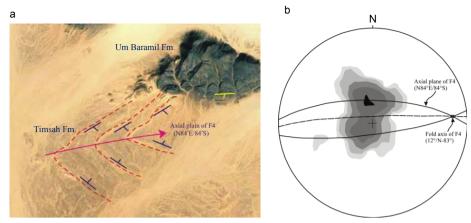


Figure 5. Folding in Nubian sandstone. a – false colored photo showing synclinal fold comprising Timsah Formation and bedding in Um Baramil Formation, photo looking to north; b – graphical solution of contoured poles to bedding associated in Nubian sandstone at Fileita area, contours at 2. 4. 8. 16 and 32% for 81 bedding.

Рисунок 5. Складчатость в нубийских песчаниках. а – цветная фотография, показывает синклинальную складку, состоящую из отложений Тимсахской свиты и слоев в Ум-Барамильской свите, объектив фотоаппарата направлен на север; b – графическое решение оконтуренных полюсов к осадочных слоям в нубийских песчаниках в районе Филейты, контуры 2, 4, 8, 16 и 32 % для 81 наслоений.

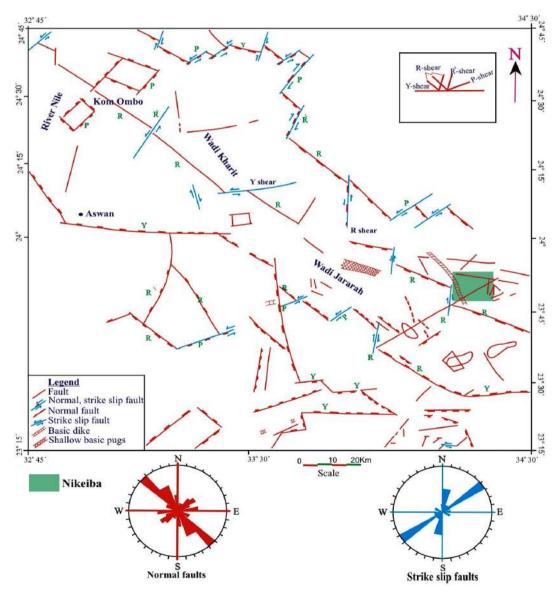


Figure 6. Interpreted tectonic map and rose diagram showing faults trends based on aeromagnetic data for Wadi Kharit / Wadi Jararah area, Eastern Desert, Egypt, after [15].

Рисунок 6. Интерпретированная тектоническая карта и роза-диаграмма, показывающие направления разломов на основе аэромагнитных данных для района Вади-Харит/Вади-Джарара, Восточная пустыня (Египет), по [15].

the direction of the maximum resolved shear stress along the fault plane and corresponds to the measured striae. 3) Faults moved independently but consistently with a single and common stress tensor during the tectonic event. 4) Fault displacement is small relative to the fault surface area [16, 17]. Paleostress reconstruction of brittle deformation is based on the analysis of fault slip data using computer programs of tensor [8–10, 16]. These methods depend on determining the best fitting reduced paleostress tensor for a given fault slip data set. The direction of slip on a fault plane depends on the orientation of the maximum (σ_i) , intermediate (σ_3) , and minimum (σ_3) principal stress axes and on the ratio $\Phi = (\sigma_3 - \sigma_3)/(\sigma_1 - \sigma_3)$. This ratio provides a convenient index to characterize the relationship between the principal stress magnitudes. It ranges from 0 (meaning that $\sigma_1 = \sigma_2$) to 1 (meaning that $\sigma_2 = \sigma_3$) to 1 (meaning that $\sigma_3 = \sigma_4$) to 1 (meaning that $\sigma_4 = \sigma_4$) to 1 (mean $=\sigma_{3}$). Whereas simple extension generally corresponds to high values of Φ (e.g., > 0.5), multidirectional extension is characterized by low values that make σ_2/σ_3 stress permutation easier. In compressional tectonics, changes between reverse and strike-slip faulting modes generally correspond to situations with low values of Φ, down to about zero [18]. A quality estimator of data dispersion is the average "ratio upsilon" of RUP. Possible value of estimator RUP ranges from 0% (maximum shear stress parallel to slip with the same sense) to 200% (maximum shear stress parallel to slip with opposite sense). The average ratio of the direct inversion method (RUP) in percent (100) value < 75% = good consistency [19] as, it generally corresponds to good fits between actual fault slip data distribution and computed shear stress distribution. Another quality estimator is calculated, ANG as to the average angle (in degrees) between the measured lineation and the computed slip lineation. The results are acceptable for values between 1° to 25° [19] which are the case of the present analyses.

In the present study, paleostress tensor analyses have been conducted in the studied area based on crosscutting and geometrical relationships between faults and dikes. Twenty-one stations have been studied in which 166 fault slip data were used in calculation. Their analyses allow the calculation of 21 paleostress tensors. There are 29 faults characterizing extension, 132 faults characterizing simple shear (compressional) regime and 5 faults characterizing pure shear regime.

A - Extensional stress regime

It has been defined fault-slip data sets of system in 5 sites (Table 1) and (Fig. 7). These systems are gathered into different extensional regimes NW-SE, NNW-SSE, NE-SW and NNE-SSW. The faults recording NW-SE to NNW-SSE striking extension are found in two sites of the area (sites 104A and 109B). While the faults recording nearly NE-SW and NNE-SSW-striking extensions are recorded in three sites (111N, 3/6C and 91A). The average orientations of σ_3 axes are N-315° and N-170° for NW-SE and NNW-SSE-striking extension, N-226° and N-45° for NE-SW extension and N-196° for NNE-SSW extension. The different alteration processes encompass albitization, hematitization, kaolinitization and dissilicification affected Wadi Road El-Sayalla granitoid plutons are similar to those trends of normal deep seated faults resulted from an aeromagnetic map. These fault trends are NW-SE to NNW-SSE, NE-SW, E-W and N-S in which reveal NE-SW to ENE-WSW, NW-SE, N-S, and E-W extensional trending minimum stress (σ_3). These extensional trends considered the most important trends for higher radioactive zones at Nikeiba area as reported by [20].

B - Compressional stress regime

It has been defined using 137 faults from simple shear system and 5 faults from pure reverse compression system in 16 sites (Table 1) and (Fig. 7). These systems are gathered into five events of different compressional regimes N-S, NNW-SSE, NW-SE, E-W and NE-SW. The strike-slip regime (σ_2 vertical with horizontal σ_1 and σ_3) occurs in 15 sites. The compressional event is detected from strike-slip systems (sites 91, 3/6D for N-S while 109 and 3/6 for NNW). The computed σ_1 for this system plunges 14°, 39°, 4° and 15° in 187°, 172°, 156° and 337° directions. The NW-SE compressional event represents strike-slip phases (sites 92, 101A, 102, 104, 109A and 111). The computed σ_1 for these systems are 327°, 326°, 165°, 129°, 304° and 313° with plunges from 27°, 18°, 74°, 8°, 1° and 16°. From (Fig. 7) the alkali feldspar granite take an oval shape along the NW-SE direction as the same direction of the foliation planes in the metavolcanics in which their strike ranges between 120° to 160°. Quartz syenite affected by the N-S strike slip left lateral compression causing the displacement of their plutons (Fig. 7).

The faults recording E-W-striking compression is detected from two conjugate strike-slip fault systems (93 and 101). The orientations of σ_1 axis are 104° and 276° respectively with plunges 17° and 14°. The NE-SW compressional event (sites 109C, 3/6A and 3/6B, have orientation of σ_1 in 251°, 46° and 72° directions with plunges 21°, 4° and 2° respectively. The pure compressional regime (σ_3 vertical with horizontal σ_1 and σ_2) is only detected in the NW-SE compression (reverse)

The pure compressional regime (σ_3 vertical with horizontal σ_1 and σ_2) is only detected in the NW-SE compression (reverse) (site 92A). The computed σ_1 for this system plunges 8° in 152° direction. This regime characterized by reverse fault causing highly sheared zone between syenogranite and quartz syenite. Also, the major synclinal folding (F4 generation), associated with Nubian sandstone basin at Fileita (Post-Cretaceous) and formed by pure compressional regime in NW-SE direction.

The geometry of fault populations is complex and varies from site to site. Oblique faulting is common where slip movements were initiated along pre-existing fault planes. For instance, some E-W and NW-SE trending oblique-slip faults have been reactivated into strike-slip sinstral faults (sites 102 and 92). This indicates that this event is younger than the N-S and NW-SE extensional events. Also, E-W trending oblique-slip faults have been reactivated into strike- slip dextral faults (sites 109C). This indicates that this event is younger than the N-S extensional event.

The ratio of stress differences Φ has very high value (0.5) in sites 92, 102, 104 and 111 i.e. σ_2 is very close to σ_1 so, changing between dip-slip faulting and strike-slip faulting modes can took place [18]. Conversely, where the tectonic regime is dominated by extension, a decrease in the ratio Φ results in more irregular trajectories of σ_2 and local permutations of σ_2/σ_2 [18] (site 104A and 109B).

Tectonic evolution of Road El-Sayalla area

The following geological and tectonic episodes were inferred from the present study and the geochronological data for the surrounding areas were published (Fig. 8).

Syen-tectonic granite; folding-thrusting episode (E1)

It was associated with the cratonization of the arc-inter-arc rock association. Low angle thrusting, tight and isoclinal folds of (F1) were formed during this stage (E1). Sol Hamed-Onib and Allaqi-Heiani sutures were formed due to the collision between Gerf and Gabgaba-Gebeit terrains (> 715 Ma [13]. Also, the metavolcanics are similar expressions of the ~ 750 Ma crust-forming events [21]. The compression during early folding-thrusting episode (E1) continued in the same direction to generate nearly coaxial folds (F2) with (F1). The F2 folds were formed between formation of arc-inter-arc rock association and the intrusion of the syntectonic granites 660–730 Ma [13]. The intrusion of these granites represent the end of folding-thrusting episode (E1).

Results of paleostress tensor from the measured fault-slip data at Wadi Road El-Sayalla area, Eastern Desert, Egypt.

Результаты тензора палеостресса после измерения данных о разломах в Вади-роуд Эль-Саялла, Восточная пустыня (Египет).

		Ax	e σ ₁	Axe	σ_{2}	Axe	σ_3				Conj.
Site No.	Tensor	D	P	D	P	D	P	Ф	ANG	RUP 23 15 10 10 21 48 34 12 20 54 36 27 38 36 49 33 44 36 28	No.
91A	Ex	20°	78°	287°	1°	196°	12°	0.424	3°	23	9
104A	Ex	121°	72°	224°	4°	315°	17°	0.247	3°	15	6
109B	Ex	313°	75°	78°	9°	170°	12°	0.249	2°	10	4
3/6C	Ex	188°	82°	315°	5°	45°	6°	0.390	2°	10	5
111N	Ex	29°	71°	134°	5°	226°	18°	0.33	6°	21	5
3/6D	Cp2	172°	39°	285°	26°	39°	40°	0.402	4°	48	8
91	Cp2	187°	14°	54°	69°	280°	14°	0.506	12°	34	16
92	Cp2	327°	27°	185°	56°	66°	18°	0.675	1°	12	6
93	Cp2	104°	17°	329°	67	199°	16°	0.178	3°	20	10
101	Cp2	276°	14°	33°	60	179°	26°	0.416	25°	54	16
101A	Cp2	326°	18°	137°	72°	235°	3°	0.363	9°	36	5
102	Cp2	293°	1°	202°	48°	23°	42°	0.644	4°	27	5
104	Cp2	129°	8°	348°	80°	220°	6°	0.552	4°	38	6
109	Cp2	156°	4°	50°	77°	246°	13°	0.244	11°	36	12
109A	Cp2	304°	1°	37°	70°	213°	20°	0.471	23°	49	9
109C	Cp2	251°	21°	114°	62°	348°	18°	0.176	4°	33	7
111	Cp2	313°	16°	145°	74°	44°	3°	0.524	7°	44	5
3/6	Cp2	341°	22°	162°	68°	71°	0°	0.416	7°	36	9
3/6A	Cp2	46°	4°	147°	69°	315°	21°	0.148	6°	28	12
3/6B	Cp2	72°	2°	339°	49°	163°	41°	0.256	1°	18	6
92A	Cp1	152°	8°	243°	6°	8°	80°	0.422	5°	21	5

Symbols: Ex (Extensional system), Cp2 (strike-slip shear system), Cp1 (pure compression reverse system), σ_1 , σ_2 and σ_3 = principal stress axes, D = trend of axis, P = plunge of axis, $\Phi = (\sigma_2 - \sigma_3)/(\sigma_1 - \sigma_3)$. ANG = angle between calculated and measured shear. RUP = ratio upsilon (in %) of the function defined by [9] from 0% to 200% and Conj. No. = number of conjugate fault systems (total = 166).

Late-tectonic granite; upright folding episode (E2)

It was associated with compression and shortening to the NE-SW direction which different from the NW-SE shortening direction during (E1). At the end of the E2 numerous plutons of the late-tectonic granites in the Eastern Desert are intruded parallel to the NNW-SSE to NW-SE trend [22]. The folding and foliation during the E1 and E2 provided most of the space for the granitic plutons intrusion [23].

Post-tectonic granitic episode (E3)

The syenogranite and alkali feldspar granite of Nikeiba exhibit A-type affinity intruded during this episode. On the basis of petrological and geochemical data, this batch displays anorogenic features of post orogenic environment [20, 24] (E3). So, this batch of Nikeiba post-tectonic granites can be occurred during a prolonged heating event by post-collision extension [25, 26]. It is consistent with the concept that represents a continuation of magmatism in a post-orogenic environment, which reactivates major structures.

Early Cretaceous to Post Pleistocene episode (E4 and E5)

The fourth episode (E4) is manifested by syncline folding along the axial plane bedding of F4 (N84°E/84°S) that existed after the intrusion of younger granites which were detected in the Nubian sandstone at Fileita area.

Fracturing, faulting episode (E5) is manifested in the studied area by successive events of compressional reverse, strike slip faulting and extensional normal faulting. They are detected in syenogranite, alkali feldspar granite and quartz syenite. The area is dissected by multi-trends of fault populations arranged according to relative chronology starting from the oldest event: E-W strike slip (right), N-S strike slip (left), E-W dip slip, NE-SW strike slip (right) and NE-SW dip slip main trend clusters. The N-S reactivated left lateral strike-slip faults which cross cut clayey sandstone at Fileita.

Discussions and conclusion

- 1 The detailed structural study reveals four tectonic episodes that affected the studied area; E1: Folding-thrusting episode; It is represented by tight and isoclinal folds (F1) associated with metavolcanics association. The compression during early folding-thrusting episode continued in the same direction to generate nearly coaxial folds (F2) with the isoclinal folds (F1). The intrusion of syntectonic granites (tonalite-granodiorite) marks the end of this episode 660–730 Ma [13].
- 2 E2: Upright folding episode; It is associated with compression and shortening in the NE-SW direction, which is different from the NW-SE shortening direction during E1.
- 3 E3: Post tectonic granitic intrusion episode; the syenogranite and alkali feldspar granite of Nikeiba exhibiting A-type affinity and post orogenic environment formed during a prolonged heating event by post-collision extension.
- 4 E4 and E5: Early Cretaceous to Post Pleistocene episode; syncline fold, fracturing and faulting episode show the analysis of paleostress and relative chronological data indicate that the area experienced successive events of compressional and extensional regimes starting with the oldest event; E-W strike slip (right), N-S strike slip (left), E-W dip slip, NE-SW strike slip (right) and NE-SW dip slip (main trend). Trends of the main tensions occurred along the inherited axial planes of F1, F2, F3 and F4 folds in sites (104A, 109B, (111N, 3/6C) and 91A, respectively.

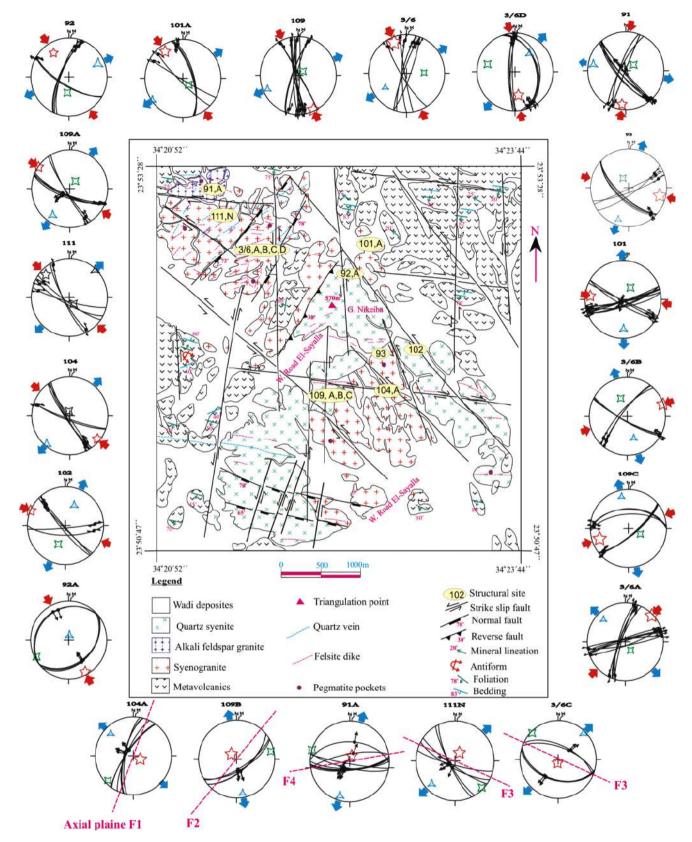


Figure 7. Lower-hemisphere Schmidt projection of fault slips data corresponding tensor for compressional and extensional phases showing their distributions on the geological map for Nikeiba plutons at Wadi Road El-Sayalla, Eastern Desert Egypt. *Symbols*: as 5-pointer star (red color) = σ_1 , 4-pointer star (green color) = σ_2 , 3-pointer star (blue color) = σ_3 ; Large blue and red arrows = direction of extension and compression, small arrows indicate slickenside sense of movement.

Рисунок 7. Нижняя полусфера проекции Шмидта данных истинной высоты сброса; соответствует тензору для растянутых и сжатых фаз, показывающих их распределение на геологической карте, для плутонов Никейба на Вади-роуд Эль-Саялла, Восточная пустыня (Египет). Обозначения: в виде звезды с 5 наконечниками (красный цвет) = σ_1 , звезда с 4 наконечниками (зеленый цвет) = σ_2 , звезда с тремя наконечниками (синий цвет) = σ_3 ; Большие синие и красные стрелки = направление растяжения и сжатия, маленькие стрелки указывают на зеркало скольжения.

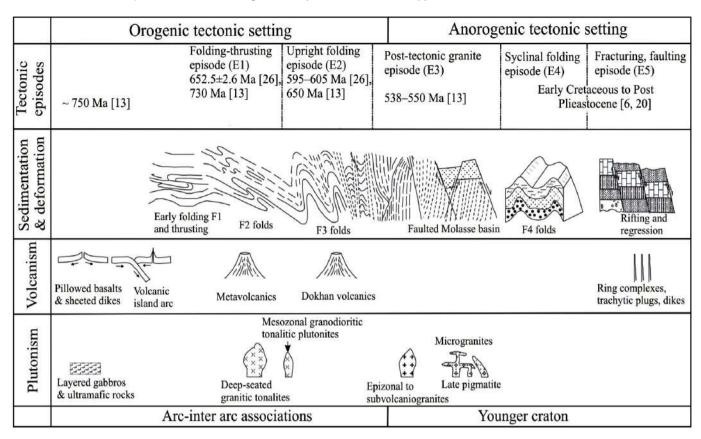


Figure 8. Tectono-stratigraphic sequence of rock association of the basement complex and non-conformable Nubian sandstone at Wadi Road El-Sayalla in the Eastern Desert, Egypt, modified after [6].

Рисунок 8. Тектоно-стратиграфическая последовательность ассоциирующих пород из комплексов основания и несогласие нубийского песчаника в Вади-роуд Эль-Саялла в Восточной пустыне, Египет, с изменениями по [6].

- 5 The NW-SE, NE-SW, E-W, NNW-SSE and N-S normal fault trends control multi injections and many alteration features. They are considered as important trends for deep seated structures from aeromagnetic map and could have acted as good directions for the radioactive mineral (thorite and uranothorite).
- 6 Mineralization appears to be structurally controlled by the interaction between inherited ductile fabrics and overprinting brittle structures. During reactivation, simple shear parallel to the inherited ductile fabrics was responsible for development of mineralized structures. Also, uranium and thorium are concentrated in accessory minerals, especially uranothorite, monazite, zircon, allanite yttrocolombite and fluorite in which they are associated with the highly altered syenogranite, alkali feldspar, quartz syenite, felsite dikes and pegmatite pockets in Nikeiba plutons at Wadi Road El-Sayalla.

REFERENCES

- 1. Ghebreab W. 1998, Tectonics of the Red Sea region reassessed. *Earth-Science Reviews*, vol. 45, issues 1–2, pp. 1–44. https://doi.org/10.1016/S0012-8252(98)00036-1
- 2. Abdelsalam M. G., Abdeen M. M., Dowidar H. M., Stern R. J., Abdelghaffar A. A. 2003, Structural evolution of the Neoproterozoic western Allaqi-Heiani suture zone, Southern Egypt. *Precambrian Research*, vol. 124, issue 1, pp. 87–104. https://doi.org/10.1016/S0301-9268(03)00080-9 3. Helmy H. M., Kaindl R., Fritz H., Loizenbauer J. 2004, The Sukari gold mine, Eastern Desert, Egypt: structural setting, mineralogy and fluid inclusion study. *Mineralium Deposita*, vol. 39, pp. 495–511. https://doi.org/10.1007/s00126-004-0426-z
- 4. Abdeen M. M., Greiling R. O. 2005, A quantitative structural study of late Pan-African compressional deformation in the central Eastern Desert (Egypt) during Gondwana assembly. *Gondwana Research*, vol. 8, issue 4, pp. 457–471. https://doi.org/10.1016/S1342-937X(05)71148-5
- 5. Zoheir B. A. 2008, Structural controls, temperature—pressure conditions and fluid evolution of orogenic gold mineralization in Egypt: a case study from the Betam gold mine, south Eastern Desert. *Mineralium Deposita*, vol. 43, issue 1, pp. 79–95. https://doi.org/10.1007/s00126-007-0156-0 6. Ali K. G. 2011, Structural control of El Sela granites and associated uranium deposits, south Eastern Desert, Egypt. *Arabian Journal of Geosciences*, vol. 6, issue 6, pp. 1753–1767. https://doi.org/10.1007/s12517-011-0489-y
- 7. Ibrahim W. S., Watanabe K., Ibrahim M. E., Yonezu K. 2015, Neoproterozoic Tectonic Evolution of Gabal Abu Houdied Area, South Eastern Desert, Egypt: As a Part of Arabian–Nubian Shield Tectonics. *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 40, issue 7, pp. 1947–1966. https://doi.org/10.1007/s13369-014-1521-9
- 8. Angelier J. 1989, From orientation to magnitudes in paleostress determinations using fault slip data. *Journal of Structural Geology*, vol. 11, pp. 37–50. https://doi.org/10.1016/0191-8141(89)90034-5
- 9. Angelier J. 1990, Inversion of field data in fault tectonics to obtain the regional stress-III. A new rapid direct inversion method by analytical means. *Geophysical Journal International*, vol. 103, issue 2, pp. 363–376. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1990.tb01777.x
- 10. Angelier J. 1994, Fault slip analysis and paleostress reconstruction. In: Hancock P. L. (ed.), Continental deformation. Oxford, New York, Seoul, Tokyo: Pergamon Press, pp. 53–100. ISBN 978-0080379302; 0080379311.
- 11. Abdel Meguid A. A. 1986, Geologic and radiometric studies of uraniferous granites in Um Ara-Um Shilman area south Eastern Desert, Egypt. PhD thesis, Suez Canal University, Egypt. 222 p.
- 12. Ali K. G., Gaafar I. M., Ibrahim T. M. 2008, Structural control and geophysical signature of Kab Amiri Epi syenitized muscovite granite and associated uranium showings, central Eastern Desert, Egypt. *Annals of the Geological Survey of Egypt*, vol. XXX, pp. 21–41.

- 13. Stern R. J., Kroner A., Manton W. I., Reischmann T., Mansour M., Hussein I. M. 1989, Geochronology of the late Precambrian Hamisana shear zone, Red Sea Hills, Sudan and Egypt. *Journal of the Geological Society*, vol. 146, issue 6, pp. 1017–1029. https://doi.org/10.1144/gsjgs.146.6.1017
- 14. Meshref W. M. 1990, Tectonic framework. *In: R. Said (ed.), The Geology of Egypt.* Rotterdam, Brookfield: A. A. Balkema, pp. 113–155. ISBN 90-6191-856-1.
- 15. Hanafy S. M. 1997, Geological, aeromagnetic and aeroradiometric studies of Wadi Jararah area, South Eastern Desert, Egypt. M. Sc. thesis, Faculty of science, Cairo University, 104 p.
- 16. Angelier J. 1984, Tectonic analysis of fault slip data sets. *Journal of Geophysical Research. Solid Earth*, vol. 89, issue 87, pp. 5835–5848. https://doi.org/10.1029/JB089iB07p05835
- 17. Faure S., Tremblay A., Angelier J. 1996, State of intra-plate stress and tectonism of northeastern America since Cretaceous times, with particular emphasis on the New England-Quebec igneous province. *Tectonophysics*, vol. 255, issues 1–2, pp. 111–134. https://doi.org/10.1016/0040-1951(95)00113-1
- 18. Hu J. C., Angelier J. 2004, Stress permutations: Three-dimensional distinct element analysis accounts for a common phenomenon in brittle tectonics. *Journal of Geophysical Research*. *Solid Earth*, vol. 109, issue B9, B09403. https://doi.org/10.1029/2003JB002616
- 19. Bergerat F., Angelier J. 1998, Fault systems and paleostresses in the Vestfirdir Peninsula. Relationships with the Tertiary paleo-rifts of Skagi and Snaefells (Northwest Iceland). *Geodinamica Acta*, vol. 11, issue 2–3, pp. 105–118. https://doi.org/10.1080/09853111.1998.11105313
- 20. Abdel Gawad A. E. 2011, Geology and radioelements potentialities of unconformable basement-sedimentary rocks at G. Nikeiba and G. Fileita areas, south Eastern Desert, Egypt. PhD thesis, Faculty of Science, Minufiya University, Egypt, 141 p.
- 21. Ali K. A., Stern R. J., Manton W. I., Kimura J. I., Khamees H. A. 2009, Geochemistry, Nd isotopes and U–Pb SHRIMP zircon dating of Neoproterozoic volcanic rocks from the central Eastern Desert of Egypt: New insights into the ~750 Ma crust-forming event. *Precambrian Research*, vol. 171, issues 1–4, pp. 1–22. https://doi.org/10.1016/j.precamres.2009.03.002
- 22. Abdel Meguid A. A. 1992, Late Proterozoic Pan-African tectonic evolution of the Egyptian part of the Arabian-Nubian Shield. Middle East Research Center (M. E. R. C.) Ain Shams University, Earth Sc. Ser., vol. 6, pp. 13–28.
- 23. Cobbing J. 2000, The geology and mapping of granite batholiths. Springer, Berlin, Heidelberg, 141 p. ISBN 978-3-540-67684-3. https://doi.org/10.1007/3-540-45055-6
- 24. Eliwa H. A., Ali K. G., Masoud S. M., Murata M., Abdel Gawad A. E. 2018, Geochemical features of granitoids at Nikeiba area, Eastern Desert, Egypt // Vserossiyskaya nauchnaya konferentsiya "Ural'skaya mineralogicheskaya shkola-2018" [XXIV All-Russian scientific conference "Ural Mineralogical School-2018"]. 280 p. URL: http://www.igg.uran.ru/sites/default/files/Conferences/minshkola-2018_abstracts.pdf
- 25. Xie Z., Zheng Y. F., Zhao Z. F., Wu Y. B., Wang Z., Chen J., Liu X., Wu F. Y. 2006, Mineral isotope evidence for the contemporaneous process of Mesozoic granite emplacement and gneiss metamorphism in the Dabie orogen. *Chemical Geology*, vol. 231, issue 3, pp. 214–235. https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2006.01.028
- 26. Moussa E. M. M., Stern R. J., Mantonb W. I., Ali K. A. 2008, SHRIMP zircon dating and Sm/Nd isotopic investigations of Neoproterozoic granitoids, Eastern Desert, Egypt. *Precambrian Research*, vol. 160, issues 3–4, pp. 341–356. https://doi.org/10.1016/j.precamres.2007.08.006

The article was received on September 10, 2018

УДК 551.243(620)

https://doi.org/10.21440/2307-2091-2018-4-7-17

Структурная эволюция района Вади роуд Эль-Саялла, Восточная пустыня (Египет)

Халед Гамаль АЛИ¹, Хасан Али ЭЛИВА2 Масуд Салах МАСУД¹, Мамору МУРАТА³, Ахмед Эль Саед АБДЕЛЬ ГАВАД

1Управление ядерных материалов, Каир, Египет

Район Вади роуд Эль-Саялла является частью юга Восточной пустыни Египта. Он состоит из двух плутонов, основания комплексов горных пород Никейба и песчаников Филейта Нубиан. В состав плутонов Никейба входят метавулканиты, сиенограниты, шелочные полевошпатовые граниты и кварцевые сиениты, прорванные дайками фельзитов и долеритов и кварцевыми жилами, все эти комплексы пород несогласно перекрываются нубийскими песчаниками в районе Филейты.

Цель работы. Исследование заключается в выяснении взаимодействия между унаследованными пластическими структурно-текстурными элементами и наложением хрупких структур. Важно реконструировать тектоническую эволюцию района Вади-роуд Эль-Саялла, что поможет определить границы минерализации в исследуемой области.

Методы исследования. Анализировалось сгибание, связанное с пластическими структурно-текстурными элементами, с использованием программных пакетов стереографической проекции GE Orient версии 9.4.5. Анализ трешин, связанных с хрупкими структурами, проводился количественно с использованием палеостресс анализов различных наборов для расчета тензоров, связанных с различными событиями сжатия и экстенсионализации с использованием программы Tensor.

Результаты. Структурная эволюция в исследуемой области подразделяется на пять структурных эпизодов: E1: синтектонический гранит (тоналитгранодиорит); эпизод сгибания, связанный с кратонизацией островодужных и междуговых комплексов пород. Е2: позднетектонический гранит; эпизод прямой складки, связанный со сжатием в направлении NE-SW. ЕЗ: Интрузии посттектонических гранитов с образованием сиеногранитов и шелочно-полевошпатовых гранитов Никейбы. Е4 и Е5: от раннемелового до постплейстоценского периодов проявляется синклинальное сгибание вдоль направления ENE-WSW в нубийском песчанике Филейта (E4). С другой стороны, E5: Разрушение, тектоническая зона характеризуется многочисленными разломами (сдвиговый разлом EW (правый, самый старый), сдвиговый разлом NS (левый), вертикальное смещение E-W, сдвиговый разлом NE-SW (правый) и NE-SW вертикальное смещение (самое молодое). Акцессорные минералы, такие как торит, ураноторит, монацит, циркон, аланит, иттроколумбит и флюорит, по-видимому, структурно контролируются взаимодействием между унаследованными пластическими структурно-текстурными элементами и наложением хрупких структур. Нормальные сбросы NE-SW, NW-SE, E-W, NNW-SSE и N-S являются важными глубоко залегающими структурами, которые контролируют многочисленные дайки фельзитов и долеритов и соответственно наложенные изменения, которые могут нести различную рудную минерализацию.

Ключевые слова: Вади роуд Эль-Саялла, Никейба, Филейта, Египет, сдвиговая складчатость, кратонизация, образование складчатости, образование разломов.

Статья поступила в редакцию 10 сентября 2018 г.

²Университет Минуфия, Каир, Египет

³Университет Hapyтo, National University Corporation, Hapyto, Япония

УДК 622.276.65

Control of movement of heat front during oil reservoir with thermal treatment

Bagir Ali BAGIROV^{1,*}, Agharza Mesud HAJIYEV^{2,**}

¹SOCAR, OilGas Scientific Research Project Institute, Baku, Republic of Azerbaijan

Relevance. For efficiency of oil field development, Enhanced Oil Recovery (EOR) methods are used. These methods can be classified into physical-chemical, thermal, microbiological, nuclear, etc. Among these treatments, the thermal method has a special place. It is related to the fact, that these methods are applied to the formations with scavenger (tight) oil, where ultimate oil recovery factor otherwise cannot exceed 0.2–0.3. Thermal methods are aimed to reduce the viscosity of the oil, thus increasing its mobility in the reservoir. The method is based on pumping the driving substance (steam or hot water) into the reservoir, and also on burning the oil in the reservoir (in-situ combustion).

Purposes and objectives of the study. The efficiency of the thermal treatment largely depends on geological and physical conditions of the oil reservoir – its depth, physical and chemical characteristics of the fluids, reservoir type, oil, gas and water saturation.

The substance to be heated in the reservoir is oil. However, part of thermal energy heats water and the rock as well. Therefore, it is very important to study the reservoir before the start of thermal treatment. Geologically heterogeneous layers especially require detailed study.

The thermal methods have been tested on the reservoirs, occurring at different depth. However, the efficiency of thermal treatment decreases with depth. The reason for that is the loss of the heat on its way in the borehole, from one hand, and higher temperature of the formation itself, on the other. That is why, the application of the thermal methods on the deeper horizons are limited.

Results and recommendation. Apparently, the successful application of thermal treatment of the reservoirs requires the systematic monitoring of the development process, which allows to correct the treatment process in a timely manner. Getting the information about formation current physical characteristics, making temperature measurements are challenging and expensive processes. The processing of the information also takes time. All of this can have negative effect on ultimate recovery factor. Usually, construction of isotherm maps is recommended for thermal treatment monitoring. However, these maps not always indicate the direction of the movement of the injected heat. Thus, the effective method of controlling and monitoring of the thermal treatment is very relevant task of the reservoir geology.

Keywords: reservoir, oil recovery, thermal treatment, temperature, exposure to steam, in-situ combustion, water mineralization.

ntroduction

For efficiency of oil field development, Enhanced Oil Recovery (EOR) methods are used. These methods can be classified into physical-chemical, thermal, microbiological, nuclear, etc. [1–3].

Among these treatments, the thermal method has a special place. It is related to the fact, that these methods are applied to the formations with scavenger (tight) oil, where ultimate oil recovery factor otherwise cannot exceed 0.2–0.3 [4]. Thermal methods are aimed to reduce the viscosity of the oil, thus increasing its mobility in the reservoir. The method is based on pumping the driving substance (steam or hot water) into the reservoir, and also on burning the oil in the reservoir (in-situ combustion).

The efficiency of the thermal treatment largely depends on geological and physical conditions of the oil reservoir – its depth, physical and chemical characteristics of the fluids, reservoir type, oil, gas and water saturation.

The substance to be heated in the reservoir is oil. However, part of thermal energy heats water and the rock as well. Therefore, it is very important to study the reservoir before the start of thermal treatment. Geologically heterogeneous layers especially require detailed study.

The thermal methods have been tested on the reservoirs, occurring at different depth. However, the efficiency of thermal treatment decreases with depth. The reason for that is the loss of the heat on its way in the borehole, from one hand, and higher temperature of the formation itself, on the other. That is why, the application of the thermal methods on the deeper horizons are limited.

Apparently, the successful application of thermal treatment of the reservoirs requires the systematic monitoring of the development process, which allows correcting the treatment process in a timely manner. Getting the information about formation current physical characteristics, making temperature measurements are challenging and expensive processes. The processing of information also takes time. All this can have negative effect on ultimate recovery factor. Usually, construction of isotherm maps is recommended for thermal treatment monitoring. However, these maps not always indicate the direction of the movement of the injected heat. Thus, the effective method of controlling and monitoring of the thermal treatment is very relevant task of the reservoir geology.

Suggested method

The method is based on the fact, that injected heat transfer agent will increase the temperature and mobility of fluids, but will also change the ion and salt composition of the formation water. The heat transfer agent can be steam, hot water, as well as the products of combustion of oil in the reservoir [5–7]. One has to pay attention to the fact that the water flow in the reservoir is faster than the spreading of the heat in the rock matrix or in the saturated fluids. Therefore, the change in water chemistry is meaningful indicator, which allows finding areas and zones of the field affected by thermal treatment. The behavior of chemical components of the solution depends on the method of treatment. Injected steam will decrease the salinity, or mineralization, since injected substance is basically distilled water. In-situ combustion decreases the viscosity of oil, but also increases the temperature

²Azerbaijan State Oil & Industrial University, Baku, Republic of Azerbaijan

^{* ⊠} b.bagirov.36@mail.ru

^{**}agarza.haciyev@gmail.com

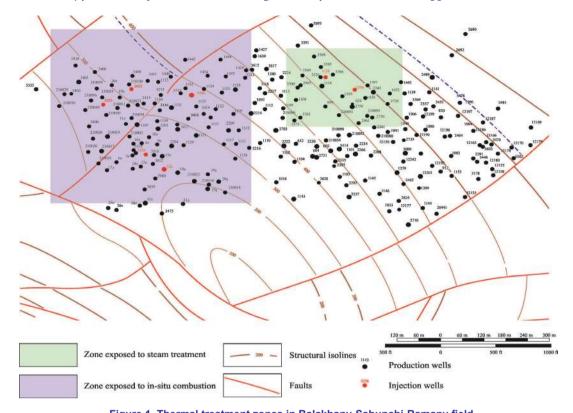


Figure 1. Thermal treatment zones in Balakhany-Sabunchi-Ramany field. Рисунок 1. Зоны тепловой обработки пласта в месторождении Балаханы-Сабунчи-Раманы.

of formation water, which increases its reactivity and solubility of components of the rock matrix. Therefore, water produced with the oil will have higher mineralization and, as a rule, the content of Na + K and Cl ions will increase.

As for hot water injection (which has not been applied in the Azerbaijan oil fields), it is reasonable to suppose that the water chemistry will change according to the chemical composition of the dissolved salts in the injected water [8].

Case studies

Below are the specific examples of realization of the suggested method.

Exposure to steam. This method was successfully used in the oil reservoir horizons II KS_u of Balakhani-Sabunchi-Ramany field (Khorasan Zone). The target is represented by frequent and uniform alternation of thin (35–45 m thick) interbeds of argillaceous and sandy rocks. Average porosity is 25% and average permeability is 0.215 mkm² (215 mDa). The area covered by thermal treatment is not complicated by faults and has 18–25° dip angles.

In place conditions the density of oil is 0.920-0.935 gcc (19.8-22.3 API), while the viscosity is $75-110 \text{ mPa} \times \text{s}$. Although the horizon has been developed since 1924, at the beginning of treatment the current oil recovery coefficient was only 0.19. Average daily well rate were between 0.6-3.2 t (4–22 bbl) oil and $0.1-8.0 \text{ m}^3$ water. WCO was 55-65%, while formation pressure of the site fluctuated from 0.07 to 1.25 MPa. To enhance filtration properties of oil in porous environment of the studied zone steam injection was first implemented in well No. 1396 (1969), and then in well No. 1128 (1970). The temperature of working agent (steam) at the wellhead was $200-220 \,^{\circ}\text{C}$ at $3.0 \,^{\circ}\text{MPa}$ injection pressure (Fig. 1).

It must be noted that the steam injection operations create three specific phase zones – steam drive zone, hot condensate zone and unswept zone [9]. Each of indicated zones affects each other. By compensating each other these zones indicate the nature and direction of heat front.

The work describes the study results of impact of temperature on physical and chemical features of the oil and reservoir water in test wells (No. 2220, 2281, 2547, 2238, 2227). It was established that the test wells exhibit regular decrease in viscosity and density of produced oil with rising temperature. However, the wells where no changes in the temperature of formation were observed (2236), there was some improvement in oil mobility. This suggested that the thermal flow affected wider area. At that, the studies indicated the considerable changes in reservoir water even in the wells where formation temperature did not change. The salinity of this water reduced from 2.5–3.1 to 0.5–2.8 °Be as a result of mixture with steam condensate (Table 1).

Comparison of physical-chemical characteristics of formation water has shown that its properties change as a result of advanced penetration of steam condensate (which is actually distilled water) via more permeable sub-layers. Such situation was observed even in wells (No. 1397, 1934), where other geological-engineering characteristics remained stable (Fig. 2).

In the course of controlled steam treatment, it was found that monitoring of hydrochemical conditions within formations in dynamics allows identifying directions of the heat flow in formations, and this can be used for control of used treatment method [4, 10].

In-situ combustion. This method is based on the capability of hydrocarbons to release heat as a result of oxidizing reactions. Heat generation directly within formation is main advantage and characteristic feature of this method. In-situ combustion works efficiently in clastic reservoirs. Disadvantage of this method is that more than 25% of oil in the reservoir is burned as a fuel, whilst final oil recovery can be increased to 20% when using this method [8, 11–15].

Table 1. Physical-chemical characteristics of formation water of horizon II KS_u Balakhany-Sabunchi-Ramany field. Таблица 1. Таблица 1. Физико-химические показатели пластовой воды на залежах горизонта II КС в месторождении Балаханы-Сабунчи-Раманы.

			Before th	e treatment			After the treatment							
147 11			Equivalent values, equiv.						Equivalent values, equiv.					
Well	°Be	CI	HCO ₃	Ca + Mg	Na + K	Σ_{a+k}	°Be	Cl	HCO ₃	Ca + Mg	Na + K	Σ_{a+k}		
2220	2.9	0.0311	0.0085	0.0014	0.0802	0.1212	0.5	0.019	0.0021	0.0013	0.0032	0.0261		
2281	2.9	0.0324	0.009	0.0017	0.0838	0.1269	2.8	0.0313	0.0091	0.002	0.0389	0.0818		
1431	3.1	0.0335	0.009	0.0015	0.0862	0.1302	0.7	0.021	0.0034	0.0009	0.0057	0.0315		
1397	3.0	0.0322	0.0093	0.0016	0.084	0.1271	2.6	0.0283	0.0091	0.0013	0.0156	0.0758		
1432	2.8	0.025	0.0112	0.0012	0.0733	0.1107	2.7	0.0256	0.0109	0.0014	0.0356	0.054		
2547	2.5	0.0239	0.0081	0.0019	0.065	0.0989	1.7	0.0156	0.0077	0.0011	0.0229	0.0478		
2238	2.7	0.0256	0.0104	0.001	0.073	0.11	2.5	0.0244	0.0101	0.001	0.0339	0.0699		
1934	3.1	0.0341	0.009	0.0015	0.0873	0.1319	2.8	0.0291	0.0098	0.0014	0.0383	0.0791		
2729	2.7	0.0246	0.0108	0.0011	0.0718	0.1083	2.7	0.0261	0.01	0.0014	0.0153	0.0533		
2248	2.9	0.0282	0.01	0.0013	0.0776	0.1171	2.8	0.0277	0.0106	0.0013	0.0175	0.0576		
2236	2.5	0.0232	0.009	0.0015	0.0655	0.0992	1.7	0.0124	0.0069	0.0011	0.0188	0.0397		

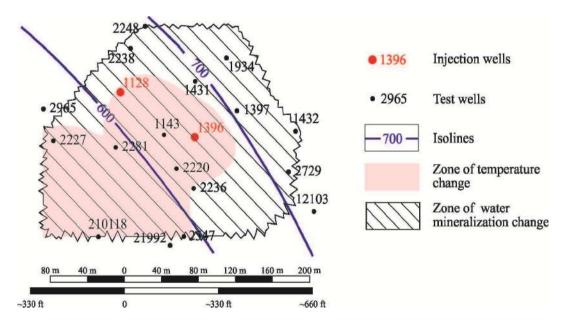


Figure 2. Map of heat distribution as a result of steam treatment in Khorasany area of Balakhany-Sabunchi-Ramany field. Рисунок 2. Карта распределения тепла в результате паровоздействия в месторождении Балаханы-Сабунчи-Раманы (площадь Хорасаны).

Let us note that as a result of process of combustion in the reservoir, ion-salt composition of formation water from the treated wells has changed. We registered this effect in wells of the Balakhany-Sabunchi-Ramany and Pirallakhi fields.

1. Horizon PKu of the Balakhany-Sabunchi-Ramany field (Khorasany area). Here PK suite, unlike other areas of the field is characterized by low oil recovery factors (< 0.30), which is mainly related to high viscosity of oil (> 50 mPa \cdot s). Accordingly, in 1973, people began to apply thermal treatment methods, in-situ combustion, in particular.

Summary of geological-engineering characteristics of target is the following.

Development of PKu began in 1919. Numerous wells have been drilled during the whole period of development, however, most wells were soon returned to the overlying formations due to low rates. The process of in-situ combustion was applied in wells No. 3326, 3323, 12z, 3396, 2632. More than 40 producers undergone treatment (Fig. 3).

Treatment continued up to 1995; during the whole period more than 600 thousand m³ of water and over 200 million m³ of compressed air have been injected into reservoir. As a result, about 230 thousand tons (1.5 mm bbl) of incremental oil was produced owing to its improved mobility at the expense of reduction of viscosity. Treatment was carried out under systematic monitoring and control. It should be noted that while temperature changes in the wells happened in different level, in most of them (particularly in wells 3375, 3z and 3518), physical-chemical characteristics of formation water changed significantly (Table 2, Fig. 4). Period of thermal stimulation is shown in grey color.

It can be seen from the presented data that in the process of in-situ combustion in horizon PK_u at the Khorasany area, hydrochemical parameters of formation experience various changes. In all cases increase of values of Na + K μ Cl ions is clearly seen, which allowed identifying zones of heat flow effect across the area.

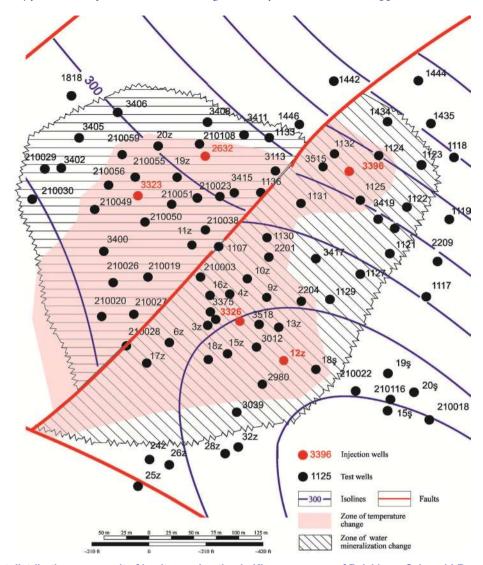


Figure 3. Map of heat distribution as a result of in-situ combustion in Khorasany area of Balakhany-Sabunchi-Ramany field. Рисунок 3. Карта распределения тепла в результате внутрипластового горения в месторождении Балаханы-Сабунчи-Раманы (площадь Хорасаны).

Table 2. Physical-chemical characteristics of formation water of horizon PK_u at Balakhany-Sabunchi-Ramany field. Таблица 2. Физико-химические показатели пластовой воды на залежах горизонта PK_u в месторождении Балаханы-Сабунчи-Раманы.

Well No. 3375			E	quivalent values			
Measurement date	Cl	SO ₄	HCO ₃	Са	Mg	Na + K	\sum_{a+k}
			Bei	fore the treatment			
24.06.1971	0.0252	0.0001	0.0074	0.0002	0.0017	0.0305	0.065
28.07.1971	0.0235	0.0002	0.0067	0.0006	0.0012	0.0284	0.0606
22.12.1971	0.0235	0.0001	0.0066	0.0005	0.0016	0.0281	0.0604
19.03.1972	0.0275	0.0001	0.0072	0.0006	0.0013	0.0328	0.069
17.06.1972	0.032	0.0003	0.0054	0.0006	0.0017	0.0354	0.075
03.09.1972	0.028	0.0002	0.0068	0.0001	0.0022	0.0327	0.07
18.01.1973	0.0255	0.0004	0.0069	0.0006	0.0016	0.0306	0.065
			Af	ter the treatment			
09.04.1973	0.1004	0.0086	0.0059	0.0154	_	0.0995	0.229
26.06.1973	0.087	_	0.0062	0.0012	0.0039	0.0881	0.186
07.09.1973	0.029	_	0.0069	0.0002	0.0019	0.0338	0.071
09.02.1974	0.0265	0.0001	0.0019	0.0004	0.0014	0.0314	0.061
19.05.1974	0.0245	_	0.0068	0.0004	0.0017	0.0292	0.062
09.08.1974	0.026	0.0006	0.0063	0.0001	0.0023	0.0315	0.066
14.12.1974	0.0275	0.0001	0.0075	0.0002	0.0021	0.0327	0.070

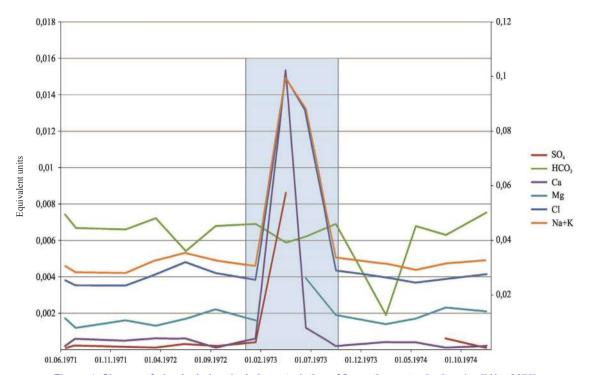


Figure 4. Change of physical-chemical characteristics of formation water in time (well No. 3375). Рисунок 4. Изменение физико-химических показателей пластовой воды с течением времени (скважина 3375).

Table 3. Physical-chemical characteristics of formation water of horizon KCu at Pirallakhi field. Таблица 3. Физико-химические показатели пластовой воды горизонта КС в месторождении Пираллахи.

Well No. 633	Equivalent values								
Measurement date	CI	SO ₄	HCO ₃	Ca	Mg	Na + K			
			Before the	e treatment					
24.01.1978	0.1550	_	0.0017	0.0071	0.0050	0.1446			
21.02.1979	0.1430	0.0009	0.0012	0.0107	0.0076	0.1268			
30.10.1979	0.1100	0.0013	0.0019	0.0067	0.0063	0.1002			
11.01.1980	0.1515	0.0007	0.0010	0.0108	0.0066	0.1358			
20.03.1980	0.1725	0.0009	0.0008	0.0132	0.0071	0.1539			
23.10.1980	0.1290	0.0023	0.0008	0.0094	0.0073	0.1154			
			After the	treatment					
17.02.1981	0.2000	0.0001	0.0007	0.0112	0.0020	0.1876			
25.02.1981	0.2120	0.0001	0.0004	0.0150	0.0077	0.1898			
27.03.1981	0.2085	0.0001	0.0004	0.0139	0.0104	0.1847			
11.05.1981	0.1360	0.0004	0.0017	0.0084	0.0061	0.1236			
20.05.1981	0.1610	0.0014	0.0012	0.0162	0.0046	0.1428			
07.08.1981	0.1405	0.0015	0.0012	0.0134	0.0028	0.1270			
18.12.1981	0.0165	0.0053	0.0004	0.0016	0.0052	0.0154			
26.01.1982	0.0720	0.0012	0.0032	0.0010	0.0053	0.0664			
15.03.1983	0.0745	0.0010	0.0038	0.0032	0.0046	0.0745			
31.05.1983	0.1025	_	0.0042	0.0032	0.0036	0.0999			
26.03.1984	0.0965	_	0.0039	0.0014	0.0029	0.0921			
19.06.1984	0.0800	_	0.0041	0.0018	0.0052	0.0771			
08.07.1984	0.0845	0.0004	0.0029	0.0052	0.003	0.0796			
23.10.1984	0.0865	_	0.0036	0.0031	0.0039	0.0831			
15.11.1984	0.0870	_	0.0043	0.0037	0.0048	0.0828			
12.12.1984	0.0610	0.0010	0.0039	0.0034	0.0035	0.0590			

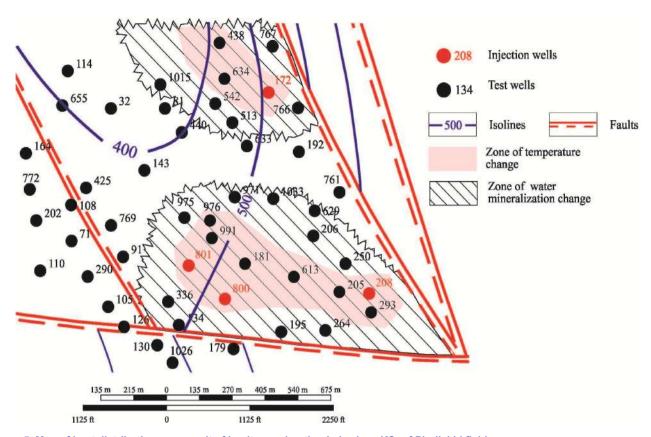


Figure 5. Map of heat distribution as a result of in-situ combustion in horizon KS_u of Pirallakhi field.
Рисунок 5. Карта распределения тепла в результате внутрипластового горения в залежах горизонта KS_u месторождения Пираллахи.

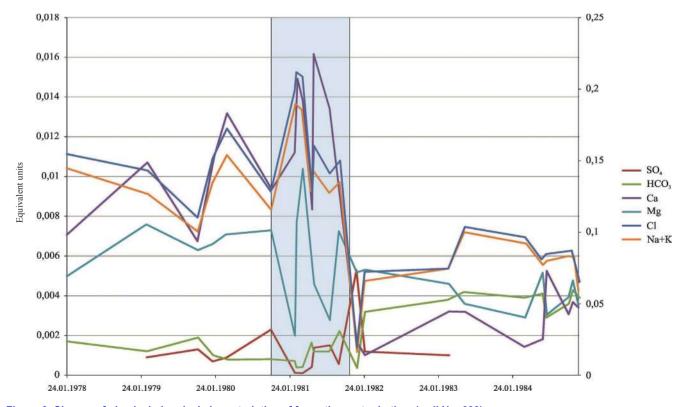


Figure 6. Change of physical-chemical characteristics of formation water in time (well No. 633). Рисунок 6. Изменение физико-химических показателей пластовой воды с течением времени (скважина 633).

2. Horizon II KS of the Pirallakhi field. Horizon KS of the Pirallakhi field is in development over 70 years. This horizon is quite heterogeneous and compartmentalized, which lead to different level of recovery in different blocks. Accumulation of significant remaining recoverable reserves of highly viscous oil in come blocks required design and application of in-situ combustion method. This method was applied in a number of wells: well 208 – 1974; wells 800 and 801 – 1976; well 172 – 1981; well 843 – 1982 (Fig. 5).

During the period of formation treatment, alongside with other geological-engineering measures hydrochemical studies were carried out. It should be noted that vast volume of data had been accumulated for this target, and increased content of Na + K and Cl ions in formation water was registered. Results of analyses for a number of wells are presented in Table 3, Fig. 6.

Period of thermal stimulation is shown in grey color.

As follows from Fig. 3, 4, 6, affected zones established just by data of thermal studies cover only part of areas, which is related to natural physical tendency of heat to move to elevated parts of the structure. Chemical-structural changes in mineralization of water encompass much greater area, giving better indication of coverage with thermal treatment.

Thermal treatment in a form of hot water injection was not used in the Azerbaijan fields. Nevertheless, one can assume that on injection of hot water mineralization of formation water will change depending on the ion-salt composition of injected water.

Conclusions

- 1. For the improvement of mobility of highly-viscous oils in reservoirs temperature within the development targets has to be
- 2. In the process of thermal treatment, in any modification, specific variations in chemical composition of formation water are observed.
- 3. This effect is in favor of inclusion of water sampling and hydrochemical analysis data into monitoring process of formations thermal treatment.

REFERENCES

- 1. Bagirov B. A. 2011, Neftegazopromyslovayya geologiya [Oil-field geology]. Baku, 311 p.
- 2. Ruzin L. M., Morozyuk O. A. 2014, Metody povysheniya nefteotdachi plastov (teoriya i praktika) [Methods of increasing petroleum oil reservoirs (theory and practice)]. Ukhta, 127 p.
- 3. Horn G. M. 2010, Coal, Oil, and Natural Gas (Energy today). N. Y., 48 p.
- 4. Bagirov B. A., Salmanov A. M., Gasanaliev M. G. 1998, Determining the quality of oil reserves. Geologiya nefti i gaza [Oil and Gas Geology], no. 1, pp. 22-25. (In Russ.)
- 5. Baibakov N. K., Garushev A. R. 1988, Teplovyye metody razrabotki neftyanykh mestorozhdeniy [Thermal methods of oil fields development]. Moscow, 343 p.
- 6. Qiuyue Song, Zhangxin Chen, S. M. Farouq Ali. 2015, Steam Injection Schemes for Bitumen Recovery from the Grosmont Carbonate Deposits. SPE Canada Heavy Oil Technical Conference, Calgary Alberta Canada, Society of Petroleum Engineers. 37 p. https://doi.org/10.2118/174463-MS 7. Ezeuko C. C., Wang J., Kallos M. S., Gates I. D. 2015, Towards the Development of Bitumen Carbonates: An Integrated Analysis of Grosmont Steam Pilots. Oil & Gas Science and Technology, vol. 70, no. 6, pp. 983-1005. https://doi.org/10.2516/ogst/2013111
- 8. Nesterov I., Shapiro A., Stenby E. H. 2013, Numerical analysis of a one-dimensional multicomponent model of the in-situ combustion process.
- Journal of Petroleum Science and Engineering, vol. 106, pp. 46–61. https://doi.org/10.1016/j.petrol.2013.03.022

 9. Youtsos M. S. K., Mastorakos E., Cant R. S. 2013, Numerical simulation of thermal and reaction fronts for oil shale upgrading. Chemical Engineering Science, vol. 94, pp. 200–213. https://doi.org/10.1016/j.ces.2013.02.040
- 10. García Hugo, Niz Velásquez Eider, Trujillo Martha 2016, Optimization of management of possible manufacturing problems in the progress of the implementation of the project of In-situ combustion at the deposit of Chichimen, Colombia, Georesources, vol. 18, no. 4-1, pp. 289-298. http:// dx.doi.org/10.18599/grs.18.4.6
- 11. Amelin I. D. 1980, Vnutriplastovoye goreniye [In-situ combustion]. Moscow, 230 p.
- 12. Surguchev M. L. 1985, Vtorichnyye i tretichnyye metody uvelicheniya nefteotdachi plastov [Secondary and tertiary formation stimulation methods]. Moscow, 308 p.
- 13. Gutiérrez D., Moore R. G., Ursenbach M. G., Sudarshan A. M. 2012, The ABCs of In-Situ-Combustion Simulations: From Laboratory Experiments to Field Scale. Journal of Canadian Petroleum Technology, vol. 51, issue 4, pp. 256-267. https://doi.org/10.2118/148754-PA
- 14. Isakov D. R., Nurgaliev D. K., Shaposhnikov D. A., Chernova O. S. 2014, Features of mathematical modeling of in-situ combustion for production of high-viscosity crude oil and natural bitumens. Khimiya i tekhnologiya topliv i masel [Chemistry and Technology of Fuels and Oils], no. 6(586), pp. 81-83. https://doi.org/10.1007/s10553-015-0561-5
- 15. Shojaiepour M., Kharrat R., Shojaiepour M., Hashemi A. 2014, Experimental and simulation study of in-situ combustion process in carbonate fractured porous media. Journal of the Japan Petroleum Institute, vol. 57, no. 5, pp. 208-215. https://doi.org/10.1627/jpi.57.208

The article was received on March 30, 2018

https://doi.org/10.21440/2307-2091-2018-4-18-25

Контроль за продвижением теплового потока в процессе разработки нефтяных месторождений с применением термической обработки

Багир Али оглы БАГИРОВ^{1, *}, Агарза Месуд оглы ГАДЖИЕВ^{2, **}

¹Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности, Баку, Азербайджан ²НИПИ «Нефтегаз», SOCAR, Баку, Азербайджан

Актуальность. Для увеличения нефтеотдачи пластов в процессе разработки залежей применяются тепловые методы (закачка в пласт пара и горячей воды, внутрипластовое горение). Эффективное применение этих методов требует надежного контроля проводимых процессов. С этой целью обычно проводятся соответствующие замеры в скважинах, результаты которых отражаются на картах изотерм. Сопоставление таких карт, составленных для различных периодов разработки залежей, позволяет получать информацию о направлении и скорости продвижения теплоносителя по пласту. В итоге выдвигается концепция о регулировании (если это необходимо) проводимых процессов.

Цель и задачи исследования. Проводимые нами геолого-промысловые исследования по месторождениям Азербайджана показывают, что для более надежного контроля за тепловоздействием целесообразно использовать данные о гидрохимии пласта. Так, при внедрении теплоносителя не только повышается температура пласта и тем самым снижается вязкость и плотность пластовых нефтей, но и изменяются физико-химические характеристики пластовых вод. Следует отметить и то, что в процессе термовоздействия наряду с пластовыми флюидами подвергается изменениям и порода этого пласта. В итоге тепло, продвигающееся от возбуждающей скважины к скважинам реагирующим, представляет собой весьма сложную термодинамическую систему. К тому же процесс изменения гидрохимии пласта всегда опережает подобные процессы в нефтях и породах залежи. Именно этим обстоятельством обосновывается необходимость включения в комплекс исследований по контролю за тепловоздействием информации о гидрохимии пласта.

Вывод. Опираясь на материалы разработки ряда месторождений Азербайджана, авторы выявили механизм изменчивости теплового режима залежей. В частности, было установлено, что при закачке в пласт пара, представляющего собой, по существу, дистиллированную воду, соленость вод залежей уменьшается; при внутрипластовом горении за счет резкого повышения температуры пласта повышается и химическая активность вод. Это, как правило, приводит к изменению химизма вод (содержание Na + K и Cl повышается). Концепция, выдвинутая в данной статье, подтверждается геолого-промысловой информацией и иллюстрируется соответствующими картами и таблицами.

Ключевые слова: резервуар, нефтеотдача, термическое воздействие, температура, паровоздействие, внутрипластовое горение, минерализация воды.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Багиров Б. А. Нефтегазопромысловая геология. Баку: Изд. АГНА, 2011. 311 с.
- 2. Рузин Л. М., Морозюк О. А. Методы повышения нефтеотдачи пластов (теория и практика). Ухта: УГТУ, 2014. 127 с.
- 3. Horn G. M. Coal, Oil, and Natural Gas (Energy today). N. Y., 2010. 48 p.
- 4. Багиров Б. А., Салманов А. М., Гасаналиев М. Г. Об определении качества запасов нефти // Геология нефти и газа. 1998. № 1, с. 22–25.
- 5. Байбаков Н. К., Гарушев А. Р. Тепловые методы разработки нефтяных месторождений. М.: Недра, 1988. 343 с.
- 6. Song Q., Chen Zh., Farouq Ali S. M. Steam Injection Schemes for Bitumen Recovery from the Grosmont Carbonate Deposits / SPE Canada Heavy Oil Technical Conference, Calgary Alberta Canada, Society of Petroleum Engineers. 2015. 37 p. https://doi.org/10.2118/174463-MS
- 7. Ezeuko C. C., Wang J., Kallos M. S., Gates I. D. Towards the Development of Bitumen Carbonates: An Integrated Analysis of Grosmont Steam Pilots // Oil & Gas Science and Technology. 2015. Vol. 70, № 6. P. 983–1005. https://doi.org/10.2516/ogst/2013111
- 8. Nesterov I., Shapiro A., Stenby E. H. Numerical analysis of a one-dimensional multicomponent model of the in-situ combustion process // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2013. Vol. 106, June. P. 46–61. https://doi.org/10.1016/j.petrol.2013.03.022
- 9. Youtsos M. S. K., Mastorakos E., Cant R. S. Numerical simulation of thermal and reaction fronts for oil shale upgrading // Chemical Engineering Science. 2013. Vol. 94, 3 May. P. 200–213. https://doi.org/10.1016/j.ces.2013.02.040
- 10. García H., Niz Velásquez E., Trujillo M. Anticipating Operational Issues for the Field Pilot Test of Air Injection in Chichimene, Colombia // Georesources. 2016. Vol. 18. № 4-1. P. 289–298. http://dx.doi.org/10.18599/grs.18.4.6
- 11. Амелин И. Д. Внутрипластовое горение. М.: Недра, 1980. 230 с.
- 12. Сургучев М. Л. Вторичные и третичные методы увеличения нефтеотдачи пластов. М.: Недра, 1985. 308 с.
- 13. Gutiérrez D., Moore R. G., Ursenbach M. G., Sudarshan A. M. The ABCs of In-Situ-Combustion Simulations: From Laboratory Experiments to Field Scale // Journal of Canadian Petroleum Technology. 2012. Vol. 51, issue 4. P. 256–267. https://doi.org/10.2118/148754-PA
- 14. Исаков Д. Р., Нургалиев Д. К., Шапошников Д. А., Чернова О. С. Особенности математического моделирования метода внутрипластового горения при добыче высоковязких нефтей и природных битумов // Химия и технология топлив и масел. 2014. № 6(586). С. 81–83. URL: http://www.nitu.ru/xttm/2014_6.pdf
- 15. Shojaiepour M., Kharrat R., Shojaiepour M., Hashemi A. Experimental and simulation study of in-situ combustion process in carbonate fractured porous media // Journal of the Japan Petroleum Institute. 2014. Vol. 57, № 5. P. 208–215. https://doi.org/10.1627/jpi.57.208

Статья поступила в редакцию 30 марта 2018 г.

[™] ⊠ b.bagirov.36@mail.ru

agarza.haciyev@gmail.com

The chemical composition and dating of accessory zircon from granitic pegmatites in the north-eastern part of the Aduisky massif

Vera Vital'evna KHILLER', Yuriy Viktorovich EROKHIN**

Institute of geology and geochemistry of the Ural branch of the Russian Academy of Sciences Ekaterinburg, Russia

This work is made relevant by the necessity to improve chemical dating methods, when applied to high atomic and thorium zircons, for which isotopic methods cannot be used.

The purpose of the work is to study the chemical composition of the accessory zircon (cyrtolite) from granitic pegmatites in the north-eastern part of the Aduisky massif (in the Middle Urals) and determine how best to date it.

Methodology. The study comprised quantitative analysis of the chemical composition of the zircon by using a CAMECA SX 100 X-ray electron probe micro-analyser (with an electron beam diameter from 1 µm, BSE, SE, Cat, and determination of elements from beryllium to uranium). To measure the intensity of elements, we have selected the following analytical lines: Y L α , Si K α , Zr L α , Hf $M\alpha$ (analysing crystal TAP), U Mβ, Pb Mα, Ca Kα, Th Mα (analysing crystal PET), Yb Lα, Er Lα, Lu Lα (analysing crystal LiF). Calculation of the age of the zircon was carried out acri/cording to well-known, existing methods in addition to those developed by the authors. **Results.** According to the microprobe analysis, the impurity content of ThO₂, UO₂ and PbO in the zircon varied significantly, within the ranges 0.13 to 2.69, 1.59 to 15.42 and 0.05 to 0.57 wt.%, respectively. The dating calculation was carried out for each mineral (in which the analysis took place). Their age was found to be between 280 and 219 Ma. At the same time, the weighted mean was 254 ± 6 Ma (with the Mean Square of Weighted Deviates being 0.17) and the isochron showed 255 ± 7 Ma. The values of the ages found for the zircon from the pegmatites "Mys-2" agree with the isotopic data. The period of formation of the Aduisky granite massif has been estimated to be between 291 ± 8.0 Ma and 256 ± 0.6 Ma (according to zircon and monazite dating, respectively) or within the range 255 to 241 Ma (according to mica dating).

Conclusion. We have studied the accessory zircon (cyrtolite) from granite pegmatites from the "Mys-2" vein, in the north-eastern part of the Aduisky massif. We have obtained the chemical composition and calculated the age to be 255 ± 7 Ma. Dating calculations show that veined pegmatites and host granites were formed almost simultaneously (at least, in this part of the Aduisky massif). This situation justifies microprobe dating of the U-Th zircon content because the minerals are usually in a metamict state and not suitable for accurate age determination.

Keywords: zircon, chemical dating, granite pegmatites, Aduisky granite massif, Middle Ural.

ntroduction Chemical dating of minerals is widely carried out [1, 2] and is based on the precise determination of the contents of radioactive elements (Th, U) and (not) radiogenic (total) Pb by X-ray microprobe analysis. Through the use of modern microprobe analysers and the thorough development of analytical procedures, it has become possible to quickly solve problems in the direct geochronological dating of accessory minerals in thin sections of rock. The X-ray microprobe analysis method can be used for chemical dating when the content of Th, U, Pb in these minerals is above 0.03 wt.% therefore, most of the work is devoted to monazites, although some relates to dating of uraninite and other radioactive minerals [2, 3]. There are only a few studies concerning the application of this method to zircon [2, 4, 5]. Due to the low contents of thorium, uranium and lead (Pb is often n× 0.001 wt.%), zircon dating is performed using local isotope mass spectrometry with laser (LA-ICP-MS) or ion (SIMS) sampling. In practice, zircons with abnormally high concentrations of Th, U, Pb are found, particularly in alkaline and granitic pegmatites. In this case, isotope dating using a device with an ion probe is not applicable for technical reasons and it is assumed that a high adulteration of radioactive and radiogenic elements makes the result of dating unreliable ([6] and others). It is not always possible to use mass spectrometry with laser sampling (which gives the average value) due to the large diameter and depth of the crater (n \times 10 μ m). In our work, the microprobe analysis method was used for chemical dating of the zircon with abnormally high concentrations of U, Th, Pb, Hf, Y (i.e. we have determined the age of the cyrtolite).

Geology of the study area

In recent years, a number of new pegmatite veins have been discovered in the Aduisky granite massif [7]. A large number of them are located 6 to 7 km north of the village of Ozerny, south of Rezh. Pegmatites are located in the hills on the right bank of the river Rezh, which is situated on the north-eastern edge of the massif (1.5 km) [8]. There is a forest corridor at this location, associated with the power lines that cross the area. This site is rich in ceramic pegmatite veins, the largest of which were mined by tributors for feldspar for the ceramic industry at the beginning of the last century (1925-1927). Lump feldspar was mined from the upper, fractured parts of the veins to a depth of 2 to 3 m and in workings between 4 and 30 m long. The feldspar was transported by carts to the river and then further on to the station at Rezh. In total, about 1000 tons of feldspar were mined [9].

https://orcid.org/0000-0001-8491-4958 ☑ erokhin-yu@yandex.ru

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

^{*} hilvervit@mail.ru

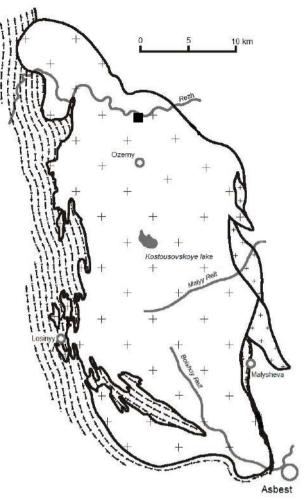


Figure 1. The lineaments of the Aduisky granite massif with marked settlements and water bodies (according to [11] with our simplifications). The filled square shows the location of the granite pegmatite "Mys-2".

Рисунок 1. Контуры Адуйского гранитного массива с вынесенными населенными пунктами и водоемами (дано по [11] с нашими упрощениями). Залитым квадратом показано расположение гранитного пегматита «Мыс-2».

One of the veins (known as "Mys-2" and located at GPS-fixing: $57^{\circ}20'36,9$ " N, $61^{\circ}12'38,3$ " E) was opened with a small digging pit of $10.0 \times 1.0 \times 1.5$ m (Fig. 1). The pegmatite body lies in the fine-grained, slightly sheared, biotite granites and its strike is about 20° . The vein has a visual zonality because it contains graphic pegmatite with muscovite in its casing and a quartz core at its centre. The vein contains the following accessory minerals: garnet, apatite, brockite, columbite, zircon, ilmenite, magnetite, polycrase, titanite, allanite and epidote [8, 10].

For the dating studies, relatively large but short, prismatic zircon (cyrtolite) crystals (up to 2.5 mm long) were selected from the block zone of the "Mys-2" vein. The mineral is characterised by a zoned colouration: light brown in the centre and dark green around the periphery of the crystals (Fig. 2, a). The green colour seems to be associated with the smallest inclusions of uraninite and thorite, which are found all over the zircon matrix. While preparing the specimens during the first grinding, the top part of the crystal was revealed (Fig. 2, b); the second grinding then opened up the deeper parts of the crystal. In addition, both polished surfaces were studied with respect to chemical dating to provide statistical data.

Study Methods

Quantitative analysis of the chemical composition of the zircon was carried out using a CAMECA SX 100 X-ray electron probe micro-analyser (electron beam diameter being from 1 μ m, BSE, SE, Cat, determination of elements from beryllium to uranium). The optical field of view was 0.25 to 1.75 mm from the sample surface. The BSE image of the crystal shows weak, spotted heterogeneity due to different heavy element contents. Small inclusions of uranium and thorium phases (not more than 5 to 10 microns in size) are fixed in the zircon matrix. To measure the intensity of elements, we selected the following analytical lines: Y L α , Si K α , Zr L α , Hf M α (analysing crystal TAP), U M β , Pb M α , Ca K α , Th M α (analysing crystal PET), and Yb L α , Er L α , Lu L α (analysing crystal LiF). The calculation of the chemical age was carried out according to well-known methods [1, 2] in addition to those developed by the authors [3, 4].

Results and discussion

According to the quantitative microprobe analysis, the impurity content of ThO_2 , UO_2 . PbO in the zircon significantly varies within the ranges 0.13 to 2.69, 1.59 to 15.42 and 0.05 to 0.57 wt.% respectively (see Table). For each point of the crystal in which analysis was carried out, the age was calculated by the Montel method [1]; the range was found to be from 219 to 280 Ma. The weighted average is 254 ± 6 Ma and the Mean Square of Weighted Deviates = 0.17 (Fig. 3).



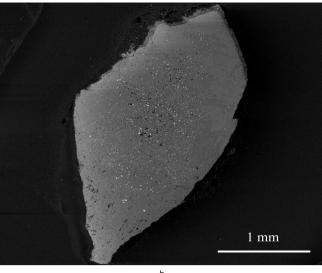


Figure 2. Zircon crystals from granite pegmatite «Mys-2»; a – appearance, length of crystals up to 2.5 mm, b – crystal cut, BSE-image, CAMECA SX 100.

Рисунок 2. Кристаллы циркона из гранитного пегматита «Мыс-2»; а – внешний вид, длина кристаллов до 2,5 мм, б – срез кристалла в шашке, BSE-изображение, CAMECA SX 100.

Due to the wide range of uranium and lead oxides, we were able to form an isochron from a set of analytical points using the CHIME method [12] in the coordinates $UO_2^* - PbO$. Using its slope angle (m = 0.03456), we calculated the U^* / Pb -age to be 255 \pm 7 Ma (see Fig. 4). $UO_2^* = (UO_2 + ThO_2^{eq})$, where ThO_2^{eq} is the thorium content, converted to the equivalent uranium content and it is capable of producing the same amount of Pb during the lifetime of the system if U-Pb and Th-Pb-age values are equal. The resulting isochron passes through the origin of the coordinates; it indicates the absence of non-radiogenic (initial) lead in the matrix of the studied zircon, as well as the absence of any addition or subtraction of radioactive components in the process of crystal evolution. The analytical points are distributed throughout the isochron, which suggests that the age estimation is probably correct.

The chemical composition (in wt.%) of zircon from granite pegmatites in "Mys-2". Химический состав (в мас. %) циркона из гранитных пегматитов Мыс-2.

					_					
No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$ThO_{\scriptscriptstyle{2}}$	0.03	0.17	0.13	0.73	0.71	0.82	0.92	1.05	2.65	0.63
UO_2	0.77	1.03	2.04	5.77	5.95	6.34	6.61	7.06	12.17	14.21
ZrO_2	57.19	59.19	57.73	54.55	54.06	53.95	53.14	52.38	45.87	44.32
HfO ₂	5.35	6.36	6.16	5.88	5.76	6.30	6.21	6.18	4.67	5.40
SiO ₂	32.53	31.76	31.38	30.81	30.63	30.86	30.67	30.44	28.68	32.38
$\mathrm{Gd_2O_3}$	0.01	0.05	0.00	0.07	0.20	0.11	0.13	0.04	0.21	0.17
Dy_2O_3	0.13	0.24	0.08	0.09	0.14	0.20	0.04	0.01	0.22	0.18
Y_2O_3	0.44	0.86	0.70	0.98	1.13	0.97	1.00	1.04	1.63	1.54
PbO	0.00	0.00	0.00	0.13	0.11	0.15	0.14	0.15	0.38	0.53
FeO	0.15	0.09	0.08	0.05	0.13	0.03	0.02	0.01	0.06	0.13
In total	96.60	99.75	98.30	99.06	98.81	99.73	98.88	98.37	96.52	99.47

Note: the sample from 41 analyses with growth of uranium from 0.77 to 14.21 wt. %.

It is interesting to note that small inclusions of uraninite and uranium-containing thorite in the zircon matrix showed similar dating, within 253 to 251 Ma. This indirectly confirms the accuracy and correctness of the chemical dating of the cyrtolite crystal carried out by us.

The age values obtained for the zircon from the "Mys-2" pegmatites equate with isotopic data. Thus, the formation time of the Aduysky granite massif covers a wide interval and is estimated to have been from 291 ± 8 Ma (according to zircon dating [13]) to 256 ± 0.6 Ma (according to monazite dating [14]). A dating range of between 255 and 241 Ma was found according to dating of the micas [11]. At the same time, the accessory monazite was precisely dated in mesocratic granites within the vicinity of the village of Ozerny (mica is found in the intersecting pegmatites [11]); this fact indicates the same time interval of the vein formations and the granites enclosing them in the area of the Aduysky massif. Recently, one of the authors of this article obtained a similar and reasonably reliable Th-U-Pb dating for accessory monazites from pegmatite veins in the same vicinity (within Ozerny village); the date derived was 254 ± 15 Ma [15, 16].

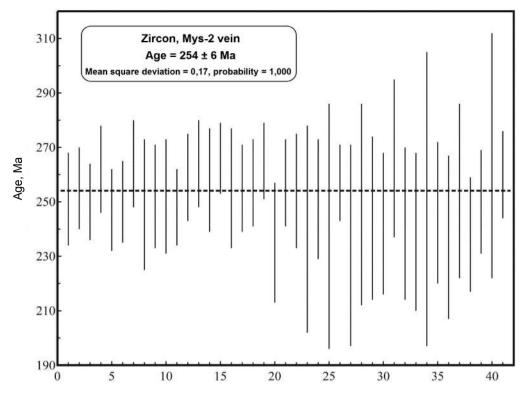


Figure 3. The weighted average Th-U-Pb-age of the zircon crystal according to microprobe analysis (41 definitions were made in total). Рисунок 3. Средневзвешенный Th-U-Pb-возраст кристалла циркона по данным микрозондовых анализов (всего сделано 41 определение).

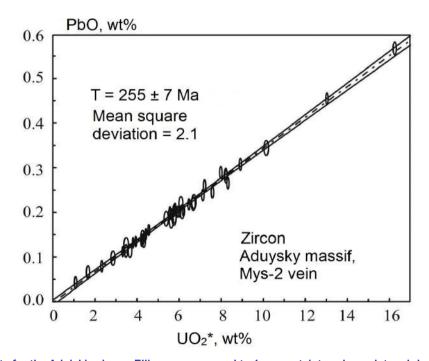


Figure 4. UO₂* – PbO data for the Aduiskiy zircon. Ellipses correspond to 1σ uncertainty values; dot-and-dash lines correspond to regression lines with two symmetric hyperbolas that fix errors.

Рисунок 4. UO₂* – PbO-данные для адуйского циркона. Эллипсы соответствуют значениям погрешности 1σ, штрих-пунктир – ли-

Рисунок 4. UO₂*– PbO-данные для адуйского циркона. Эллипсы соответствуют значениям погрешности 1σ, штрих-пунктир – линии регрессии с двумя симметричными гиперболами, фиксирующими погрешности.

Conclusion

This work has studied the accessory zircon (cyrtolite) from granite pegmatites in the "Mys-2" vein, located in the north-east-ern part of the Aduisky massif. We have obtained the chemical composition and calculated the age to be 255 ± 7 Ma. The calculated dating shows that veined pegmatites and their host granites have been formed almost simultaneously (at least, in this area of the Aduisky massif). In general, it can be added that the chemical age of zircons gives accurate results if the mineral contains

significant concentrations of uranium, thorium and lead. This case is only one of a few successful examples of microprobe dating of zircon; it is usually seen in a metamict state and is unsuitable for correct age determination.

Acknowledgments

The authors are grateful to Viktor Arkadevich Gubin for his help in carrying out this research. We were saddened by his untimely death.

This work was carried out within the framework of publicly-funded project No. 0393-2016-0019 of the state assignment of the Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry at the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

REFERENCES

- 1. Montel J.-M., Foret S., Veschambre M., Nicollet C., Provost A. 1996, Electron microprobe dating of monazite. Chemical Geology, vol. 131, issues 1-4, pp. 37-53. https://doi.org/10.1016/0009-2541(96)00024-1
- 2. Suzuki K., Kato T. 2008, CHIME dating of monazite, xenotime, zircon and polycrase: Protocol, pitfalls and chemical criterion of possibly discor-
- dant age data. *Gondwana Research*, vol. 14, pp. 569–586. http://dx.doi.org/10.1016/j.gr.2008.01.005

 3. Khiller V. V., Erokhin Yu. V., Zakharov A. V., Ivanov K. S. 2014, Th-U-Pb dating of granite pegmatites from the Lipovskoe ore field (Urals) for three minerals. *Doklady Earth Sciences*, vol. 455, issue 1, pp. 323–326. https://doi.org/10.1134/S1028334X14030180
- 4. Khiller V. V., Reverdatto V. V., Konilov A. N., Dokukina K. A., Viryus A. A., Van K. V., Romanenko I. M. 2015, Experience of chemical Th-U-Pb chemical dating of zircon from metasomatic felsic veins of the Gridino area, Belomorian eclogite province. Doklady Earth Sciences, vol. 462, issue 1, pp. 494-496. https://doi.org/10.1134/S1028334X1505013X
- 5. Suzuki K., Nakai Y., Dunkley D. J., Adachi M. 2002, Significance of c. 300 Ma CHIME zircon age for posttectonic granite from the Hercynian suture zone, Bamian, Afghanistan. Bulletin Nagoya University Museum, vol. 18, pp. 67-73. Google Scholar
- 6. Gao Yu-Ya, Li Xian-Hua, Griffin W. L., O'Reilly S. Y., Wang Y.-F. 2014, Screening criteria for reliable U-Pb geochronology and oxygen isotope analysis in uranium-rich zircons: a case study from the Suzhou A-type granites, SE China. Lithos, vol. 192-195, pp. 180-191. https://doi. org/10.1016/j.lithos.2014.02.002
- 7. Popova V. I., Gubin V. A. 2008, Mineralogy of granite ceramic pegmatites of the Aduisky, Sokolovsky and Zenkovsky massifs in the Middle Urals. *Ural'skiy mineralogicheskiy sbornik* [Ural mineralogical collection], no. 15, pp. 61–74. (*In Russ.*) URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=23876011 8. Popova V. I., Gubin V. A., Churin E. I., Kotlyarov V. A., Khiller V. V. 2013, Rare metal mineralization of granite pegmatites of the Rezhevskoy
- region in the Middle Urals. Zapiski RMO [Proceedings of the Russian Mineralogical Society], part 142, no. 1, pp. 23–38. (In Russ.) URL: https:// elibrary.ru/item.asp?id=18754476
- 9. Ginzburg I. I. 1928, Feldspars of Rezhevskoy District. Vestnik geologicheskogo komiteta [Bulletin of the Geological Committee], no. 6, pp. 39-48. (In Russ.)
- 10. Gubin V. A., Khiller V. V. 2011, Accessory tantaloniobates from the northeastern outskirts of the Aduysky granite massif (Middle Urals). Vestnik Ural'skogo otdeleniya rossiyskogo mineralogicheskogo obshchestva [Journal of the Ural branch of the Russian Mineralogical Society], no. 8, pp. 18-22. (In Russ.) URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=32206085
- 11. Smirnov V. N., Ivanov K. S., Krasnobaev A. A., Bushlyakov I. N., Kaleganov B.A. 2006, Results of K-Ar dating of the Aduisky granite massif (eastern slope of the Middle Urals). Litosfera [Lithosphere], no. 2, pp. 148-156. (In Russ.) URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=12049972
- 12. Suzuki K., Adachi M. 1991, Precambrian provenance and Silurian metamorphism of the Tsubonosawa paragneiss in the South Kitakami terrain, Northeast Japan, revealed by the chemical Th-U-total Pb isochron ages of monazite, zircon and xenotime. Geochemical Journal, vol. 25, pp. 357-376. http://dx.doi.org/10.2343/geochemj.25.357
- 13. Krasnobaev A. A., Fershtater G. B., Bea F., Montero P. 2006, Polygenic zircons of the Aduisky batholite (Middle Ural). Doklady akademii nauk [Doklady Earth Sciences], vol. 410, no. 2, pp. 244–249. (In Russ.) URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=9282380

 14. Fershtater G. B., Gerdes A., Smirnov V. N. 2003, Age and history of the formation of the Aduiskiy granite massif. *Ezhegodnik-2002* [Annual
- report-2002]. (In Russ.) Ekaterinburg, pp. 146–150. Google Scholar
 15. Votyakov S. L., Shchapova Yu. V., Khiller V. V. 2011, Kristallokhimiya i fizika radiatsionno-termicheskikh effektov v ryade U-Th-soderzhash-
- chikh mineralov kak osnova dlya ikh khimicheskogo mikrozondovogo datirovaniya [Crystal chemistry and crystallophysics of radiation-thermal effects in a number of U-Th-containing minerals as the basis for their chemical microprobe dating]. Ekaterinburg, 340 p. ISBN 978-5-94332-091-0. URL: http://www.igg.uran.ru/?q=ru/node/180
- 16. Votyakov S. L., Khiller V. V., Shchapova Yu. V. 2012, Features of the composition and chemical microprobe dating of U-Th-containing minerals. Part 1. Monazits of a number of geological objects of the Urals and Siberia. Zapiski RMO [Proceedings of the Russian Mineralogical Society], part 141, no. 1, pp. 45-60. (In Russ.) URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=17674661

The article was received on September 10, 2018

УДК 549.514.81+550.93(470.5)

https://doi.org/10.21440/2307-2091-2018-4-26-32

Акцессорный циркон из гранитных пегматитов северо-восточной части Адуйского массива (химический состав и датирование)

Вера Витальевна ХИЛЛЕР*, Юрий Викторович ЕРОХИН**

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

Актуальность работы обусловлена необходимостью совершенствования метода химического датирования в применении к высокоурановым и ториевым цирконам, которые невозможно датировать изотопными методами исследования.

Шель работы: исследование химического состава акцессорного циркона (циртолита) из гранитных пегматитов северо-восточной части Адуйского массива (Средний Урал) и определение его возраста.

Методология исследования: количественный анализ химического состава циркона выполнен на рентгеноспектральном электроннозондовом микроанализаторе CAMECA SX 100 (диаметр пучка электронов от 1 мкм, режимы BSE, SE, Cat, определение элементов от бериллия до урана). Для измерения интенсивности элементов подобраны следующие аналитические линии: Y $L\alpha$, Si $K\alpha$, Zr $L\alpha$, Hf $M\alpha$ (кристалл-анализатор TAP), U $M\beta$, Pb $M\alpha$, Ca $K\alpha$, Th $M\alpha$ (кристалл-анализатор PET), Yb $L\alpha$, Er $L\alpha$, Lu $L\alpha$ (кристалл-анализатор LiF). Расчет возраста проводился по известным методикам зарубежных авторов в дополнении с собственными наработками.

Результаты. По данным микрозондового анализа содержание примесей ThO_2 , UO_2 , PbO в цирконе сильно варьируют в пределах 0,13-2,69 1,59-15,42 и 0,05-0,57 мас. %, соответственно. Для каждой точки кристалла, в которой проводился анализ, выполнялся расчет возраста, разброс которого находится в интервале от 280 до 219 млн лет, при этом средневзвешенное значение возраста составляет 254 ± 6 млн лет (СКВО = 0,17), а изохрона показывает 255 ± 7 млн лет. Полученные значения возраста для циркона из пегматитов «Мыс-2» вполне хорошо сопоставимы и с изотопными данными. Время образования Адуйского гранитного массива оценивается в широком временном интервале от 291 ± 8 млн лет (по циркону) до 256 ± 0 ,6 млн лет (по монациту) и 255-241 млн лет (по слюдам).

Выводы. Нами изучен акцессорный циркон (циртолит) из гранитных пегматитов северо-восточной части Адуйского массива из жилы «Мыс-2». Для него был получен химический состав и рассчитан возраст 255 ± 7 млн лет. Рассчитанная датировка показывает, что жильные пегматиты и вмещающие их граниты формировались практически одновременно, по крайне мере, на данном участке Адуйского массива. Данный случай, это один из немногих удачных примеров микрозондового датирования U-Th-содержащего циркона, обычно он находится в метамиктном состоянии и непригоден для корректного определения возраста.

Ключевые слова: циркон, химическое датирование, гранитные пегматиты, Адуйский гранитный массив, Средний Урал.

Авторы выражают глубокую благодарность Виктору Аркадьевичу Губину за помощь в исследованиях и скорбят о его безвременной кончине.

Работа выполнена в рамках бюджетной темы № 0393-2016-0019 государственного задания ИГГ УрО РАН.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Montel J.-M., Foret S., Veschambre M., Nicollet C., Provost A. Electron microprobe dating of monazite // Chemical Geology. 1996. Vol. 131. P. 37–53. https://doi.org/10.1016/0009-2541(96)00024-1
- 2. Suzuki K., Kato T. CHIME dating of monazite, xenotime, zircon and polycrase: Protocol, pitfalls and chemical criterion of possibly discordant age data // Gondwana Research. 2008. Vol. 14. P. 569–586. http://dx.doi.org/10.1016/j.gr.2008.01.005
- 3. Khiller V. V., Erokhin Yu. V., Zakharov A. V., Ivanov K. S. Th-U-Pb dating of granite pegmatites from the Lipovskoe ore field (Urals) for three minerals // Doklady Earth Sciences. 2014. Vol. 455. Issue 1. P. 323–326. https://doi.org/10.1134/S1028334X14030180
- 4. Khiller V. V., Reverdatto V. V., Konilov A. N., Dokukina K. A., Viryus A. A., Van K. V., Romanenko I. M. Experience of chemical Th-U-Pb chemical dating of zircon from metasomatic felsic veins of the Gridino area, Belomorian eclogite province // Doklady Earth Sciences. 2015. Vol. 462. Issue 1. P. 494–496. https://doi.org/10.1134/S1028334X1505013X
- 5. Suzuki K., Nakai Y., Dunkley D.J., Adachi M. Significance of c. 300 Ma CHIME zircon age for posttectonic granite from the Hercynian suture zone, Bamian, Afghanistan // Bulletin Nagoya University Museum. 2002. Vol. 18. P. 67–73. Google Scholar
- 6. Gao Yu-Ya, Li Xian-Hua, Griffin W. L., O'Reilly S. Y., Wang Y.-F. Screening criteria for reliable U-Pb geochronology and oxygen isotope analysis in uranium-rich zircons: a case study from the Suzhou A-type granites, SE China // Lithos. 2014. Vol. 192/195. P. 180–191. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2014.02.002
- 7. Попова В. И., Губин В. А. Минералогия гранитных керамических пегматитов Адуйского, Соколовского и Зенковского массивов на Среднем Урале // Уральский минералогический сборник. 2008. № 15. С. 61–74. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=23876011
- 8. Попова В. И., Губин В. А., Чурин Е. И., Котляров В. А., Хиллер В. В. Редкометалльная минерализация гранитных пегматитов Режевского района на Среднем Урале // Записки РМО. 2013. Ч. 142, № 1. С. 23–38. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=18754476
- 9. Гинзбург И. И. Полевые шпаты Режевского района // Вестник Геол. Комитета. 1928. № 6. С. 39–48.
- 10. Губин В. А., Хиллер В. В. Акцессорные танталониобаты с северо-восточной окраины Адуйского гранитного массива (Средний Урал) // Вестник УрО РМО. 2011. № 8. С. 18–22. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=32206085
- 11. Смирнов В. Н., Иванов К. С., Краснобаев А. А., Бушляков И. Н., Калеганов Б. А. Результаты К-Ar датирования Адуйского гранитного массива (восточный склон Среднего Урала) // Литосфера. 2006. № 2. С. 148–156. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=12049972
- 12. Suzuki K., Adachi M. Precambrian provenance and Silurian metamorphism of the Tsubonosawa paragneiss in the South Kitakami terrain, Northeast Japan, revealed by the chemical Th-U-total Pb isochron ages of monazite, zircon and xenotime // Geochemical Journal. 1991. Vol. 25. P. 357–376. http://dx.doi.org/10.2343/geochemj.25.357

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

** 🖂 erokhin-yu@yandex.ru

(b) https://orcid.org/0000-0002-0577-5898

^{*} hilvervit@mail.ru

- 13. Краснобаев А. А., Ферштатер Г. Б., Беа Ф., Монтеро П. Полигенные цирконы Адуйского батолита (Средний Урал) // ДАН. 2006. Т. 410. № 2. С. 244–250. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=9282380
- 14. Ферштатер Г. Б., Гердес А., Смирнов В. Н. Возраст и история формирования Адуйского гранитного массива // Ежегодник-2002. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2003. С. 146–150. Google Scholar
- 15. Вотяков С. Л., Щапова Ю. В., Хиллер В. В. Кристаллохимия и физика радиационно-термических эффектов в ряде U-Th-содержащих минералов как основа для их химического микрозондового датирования. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2011. 340 с. ISBN 978-5-94332-091-0. URL: http://www.igg.uran.ru/?q=ru/node/180
- 16. Вотяков С. Л., Хиллер В. В., Щапова Ю. В. Особенности состава и химическое микрозондовое датирование U-Th-содержащих минералов. Часть 1. Монациты ряда геологических объектов Урала и Сибири // Записки РМО. 2012. Ч. 141. № 1. С. 45–60. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=17674661

Статья поступила в редакцию 10 сентября 2018 г.

УДК 549.514.81+550.93(470.5)

The redox state of chromitites from the Yambotyvissky area (Voikar-Syninsky massif, Polar Urals)

Pavel Borisovich SHIRYAEV^{1, 2, *}, Nadezhda Vladimirovna VAKHRUSHEVA^{1, 2, *}

¹Institute of geology and geochemistry of the Ural branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia ²Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia

The relevance of the work is due to insufficient knowledge of the redox state of chromitites of the Voikar-Syninsky massif. **The aim of the work** is to establish how did redox conditions change during the formation of Al-rich chemical type chromitites within the Yambotyvissky area.

Research methodology: study of the composition of ore-forming chrome-spinels and olivines from chromitites of the Yambotyvissky area; evaluation of the temperature of olivine-spinel equilibrium and oxygen fugacity in chromitite samples; study of variation in the composition of minerals and T - FO, parameters within the whole area and within individual ore bodies.

Results of the work. The composition features of ore-forming chrome-spinels and redox state of the chromitites of the Voikar-Syninsky massif of the Yambotyvissky area are studied. It was shown that ore-forming spinels of ore bodies occurring in dunites have lower Cr-number compared to chrome spinels of ores localised in harzburgites. It was found that Fe/(Fe+Mg) of olivines and spinels, which compose the chromitite of the area, were directly proportional. It indicates the rock – ore equilibrium existence in the system. The change in the chemical composition of ore-forming chrome spinels, the temperature of olivine-spinel equilibrium and oxygen fugacity within individual ore bodies were studied. The oxygen fugacity increases from the inner parts of chromitite bodies towards their endocontacts. It was shown that in Al-rich chromitites an increase in oxygen fugacity is followed by an enrichment of chrome spinel quantity in the ore. Chromitites occurring both in the dunite bodies and harzburgites, have been formed under close redox conditions. The data obtained were compared with the results of mineral composition and redox state of the chrome ores of the Ray-Is massif from previous studies.

Keywords: redox state, chromitites, ultramafites, Voikar-Syninsky massif, metamorphism, ore formation.

Introduction

The geological and petrological studies of the Voikar-Syninsky massif significantly contributed to the development of ideas on the conditions of formation and evolution of ophiolite complexes. Despite the remoteness and inaccessibility of the object, compared with the Ray-Iz massif located to the north, the quantity of scientific research is very high. Issues concerning the geological structure of the massif, the metamorphism of mafic and ultramafic rocks, their petrostructural features and chromite content are highlighted in A. A. Savelyev, G. N. Savelyeva, N. L. Dobretsov, Yu. E. Moldavantsev, V. N. Puchkov, S. A. Shcherbakov A. B. Makeev, E. P. Tsaritsyn, I. S. Chashchukhin, A. A. Efimov and many others.

The oxythermobarometry study of the Voikar-Syninsky massif chromitites was performed [1–4]. I. S. Chashchukhin and co-authors [1] have studied several samples of chromium ores from different parts of the massif. For the sample of aluminous chromitite (the Cr_2O_3 content in the ore-forming spinel is less than 40 wt.%), the lowest values of fO_2 (0.8 logarithmic units above FMQ buffer) were obtained, and the highest values (1.8–2.7 logarithmic units above FMQ buffer) were for high-chromium chromitites. This data is presented in the table of results, and the relationship between the chemical type of spinel and oxygen fugacity is not discussed. The results of I. S. Chashchukhin are used in the article [2].

In our works [3, 4], it was found that the Al-rich chromitites of the northern part of the Voikar-Syninsky massif are less oxidised ($-0.5 \dots + 1.5$ logarithmic units regarding the FMQ buffer) than chromium ones ($+1.8 \dots + 3$, 5 logarithmic units in relation to FMQ buffer) [3]. In the ore body section of high-chromium chromitites of the Arkashorsky ore occurrence, fO₂ (FMQ) varies within $+1.8 \dots + 2.8$ logarithmic units. A decrease in fO₂ is observed where the body comes into contact with the host rocks and inside the deformation zone dividing it into two blocks [4].

The purpose of this work is to establish how did redox conditions change during the formation of Al-rich chromitites within the Yambotyvissky area.

Geological structure of the Yambotyvissky area

The ultramafic Voykaro-Syninsky, Ray-Iz and Syum-Keu massifs constitute most of the main watershed range of the Polar Urals. Ophiolites are integrated into the system of allochtons, overriding westward to the Paleozoic sequences of the Central Ural uplift [5, 6]. According to modern concepts [6, 7] they are large fragments of the oceanic-type crust and lithosphere formed in the back-arc and inter-arc marginal basins, including in the sub-subduction conditions in the Early and Middle Paleozoic.

Ultramafites of the Voikar-Syninsky massif are represented by rocks of the reticular and banded dunite-harzburgite complex, which are fringed with gabbroids both from the north and from the south. There can be traced metamorphic zoning in rocks: from west to east, the high-temperature apoharzburgite mineral parageneses are replaced by low-temperature ones [8].

The Yambotyvissky area is located at the Yambotyvis stream watershed and the Left Payera River (Fig. 1). In the southeast the tectonic contact of ultramafites and gabbroids takes place; therefore, in ultramafites of the southern part of the area, rocks of the vein dunite-wehrlite-clinopyroxenite (Kershorsky) complex occured.

shiryayev@igg.uran.ru
 https://orcid.org/0000-0002-3090-6001
 vakhruscheva@igg.uran.ru
 https://orcid.org/0000-0002-2790-8401

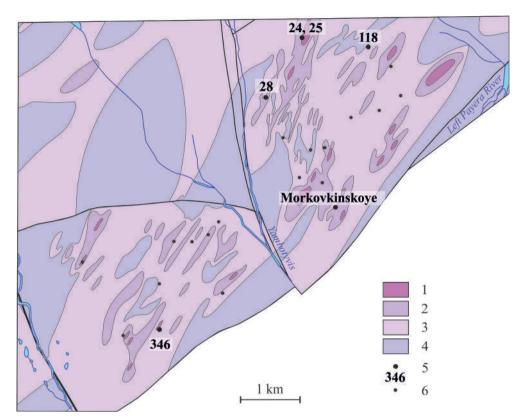


Figure 1. The geological structure of the Yambotyvissky area. 1–4 – rocks of the dunite-harzburgite complex: 1 – dunites. 2–4 – the content of the dunite component in harzburgite: 2 – more than 30%, 3 – 10-30%, 4 – less than 10%; 5 – ore occurrences studied in this work and their numbers; 6 – other ore occurrences.

Рисунок 1. Геологическое строение Ямботывисской площади. 1–4 – породы дунит-гарцбургитового комплекса: 1 – дуниты; 2–4 – содержание дунитовой составляющей в гарцбургитах: 2 – более 30 %, 3 – 10–30 %, 4 – менее 10 %; 5 – рудопроявления, изученные в настоящей работе, и их номера; 6 – прочие рудопроявления.

The amount of dunite component in the dunite-harzburgite complex rocks of the Yambotyvissky area varies from 10-70%, with a background content of 15–20%. Dunites appeared both in the form of veins in harzburgites, which thickness varies from the first centimetres to tens of centimetres, and as a dunite bodies with a width of up to 100–150 m. The form of dunite bodies is predominantly lenticular, less often close to isometric. Dunite bodies and areas with a high dunite content have a northeast extintion (Fig. 1).

Apoharzburgite metamorphic associations are formed under the influence of equilibrium and non-equilibrium metamorphism [8]. Non-equilibrium metamorphism (amphibolisation) is manifested in the development of talc-amphibole aggregate pseudomorphose on enstatite. Equilibrium metamorphic rocks are represented by amphibole-olivine, amphibole-olivine-antigorite and olivine-antigorite (voikarite) rocks.

The apoharzburgite metamorphic rocks of the northern part of the area are represented by voikarites; to the south they are replaced by amphibole-olivine-antigorite rocks and after amphibole-olivine rocks; further to the south, amphibolised and serpentinisated harzburgites dominate.

In the present work, the chromitites of the largest chromite occurrences No. 24, 25, 28, 118, 346, Morkovkinskoye (Fig. 1) were studied. They differ both in structural and textural features and in the petrographic composition of the ore-bearing rock section.

Chromitites of the occurrences 24 and 25 occur in the body of dunites. In ore manifestation 24, impregnated-banded chromitites of a poorly-rarely impregnated structure prevail and occurrence 25 has medium-densely disseminated with thick schlieren.

The mineralization of ore occurrences 28, 118, 346 and Morkovkinskoye is localised in apoharzburgites. The ore bodies are surrounded by a dunite envelope, which thickness varies from 10–15 cm to 1–2 metres. The chromitites of chromite occurrence 28 are medium-grained, varying from medium to densely disseminated. At the occurrence 118 densely disseminated chromitites of massive structure are developed. For chromitites of the occurrence 346, schlieren texture is typical – among the fine-grained medium-disseminated matrix there are isolated lenticular and irregular shapes composed of densely disseminated medium-grained chromitite. Nodular chromitites are typical of the Morkovkinsky ore occurrence. The nodules have the shape of distorted octahedra with rounded edges and an average diameter of approximately 1.5 cm.

The chemical composition of ore-forming chrome spinel

The chemical composition of minerals is determined using microprobe analysis (Cameca SX-100 installation, the analysts are N. N. Kononkova, V. I. Vernadsky (Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of RAS, Moscow). The ore-forming chromic spinels of the Yambotyvissky area chromitites are of the Al-rich magnesia chemical type (Fig. 2) and contain 37–44 wt.% Cr_2O_3 with an Al_2O_3 content of 24–30 wt.%. Spinels from chromite ores of ccurrences 24 and 25 have the lowest chromium content and the highest one from occurrence 28. The compositions of the chrome spinels of the Morkovkinskoye ore manifestations

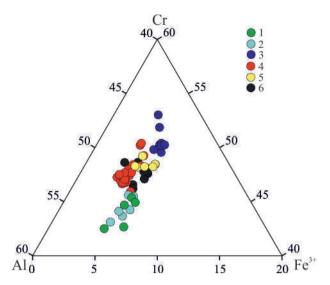


Figure 2. Compositions of ore forming chrome spinels from Yambotyvissky area. Ore occurrences: 1-24, 2-25, 3-28, 4-118, 5-346, 6 - Morkovkinskoye.

Рисунок 2. Диаграмма составов рудообразующих хромовых шпинелей Ямботывисской площади. Рудопроявления. 1 – 24, 2 – 25, 3 – 28, 4 –118, 5 – 346, 6 – Морковкинское.

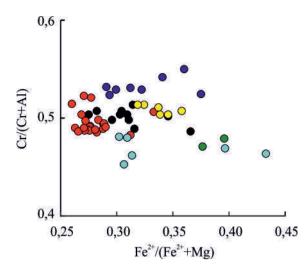


Figure 3. Cr/(Cr+Al) vs Fe²⁺/(Fe²⁺+Mg) diagram of the ore-forming chromic spinels of the Yambotyvissky area. The legend keys are shown in Figure 2.

Рисунок 3. Диаграмма железистость-хромистость рудообразующих хромовых шпинелей Ямботывисской площади. Условные обозначения см. на рисунке 2.

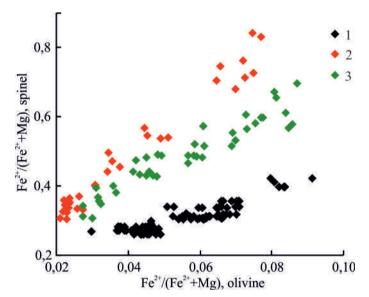


Figure 4. Ferruginosity of olivine - ferruginosity of spinel diagram. 1 - chromitites of the Yambotyvissky area, 2 - chromitites and wall-rock ultramafites from Tsentralnoye deposit, 3 - chromitites and wall-rock ultramafites from Engayskoye ore within the Ray-Iz massif. Рисунок 4. Диаграмма железистость оливина-железистость шпинели. 1 - хромититы Ямботывисской площади, 2 - хромититы и ультрамафиты месторождения Центральное, 3 – хромититы и ультрамафиты Енгайского рудопроявления массива Рай-Из.

118, 118a and 346 are close to each other. In terms of the ratio of Cr and Al cations they occupy an intermediate position between the spinels of the ore occurrences 24, 25 and 28.

Iron oxidation state (Fe # = Fe³⁺ / (Fe³⁺ + Fe²⁺) in spinel for all the studied ore occurrences is in the range of 15–27%. Spinels of 118 occurrence contain the least amount of trivalent iron; they also have the lowest ferruginosity ($f = Fe^{2+}/(Fe^{2+} + Mg)$). It is noteworthy (Fig. 3) that there is no correlation between the contents of divalent and trivalent cations, which is typical of the ore-forming chrome spinels of the Ray-Iz massif [9].

There is a direct proportionality of $Fe^{2+}/(Fe^{2+}+Mg)$ between of olivine and spinel (Fig. 4). The ratio of olivine Fa/ferruginosity of spinel for Yambotyvissky area chromitites is two times higher than for the Tsentralnove deposit of the Ray-Iz massif and one and a half times higher than those of Engayskoe occurence [9]. For the Ray-Iz massif trends in the composition of olivine and spinel for each of the objects are common to chromitites and the equilibrium meta-ultramafites enclosing them (Fig. 4). This indicates the metamorphic genesis of the chromitites. The studied chromitites of the Yambotyvissky area occur in non-equilibrium metamorphites (amphibolised harzburgites), however, the compositions of olivine and chrome spinels fall on a single trend line. This confirms that the change in the trend line slope reflects the change in the parameters of ore formation and metamorphism, but not the different Cr content of spinel [10, 11].

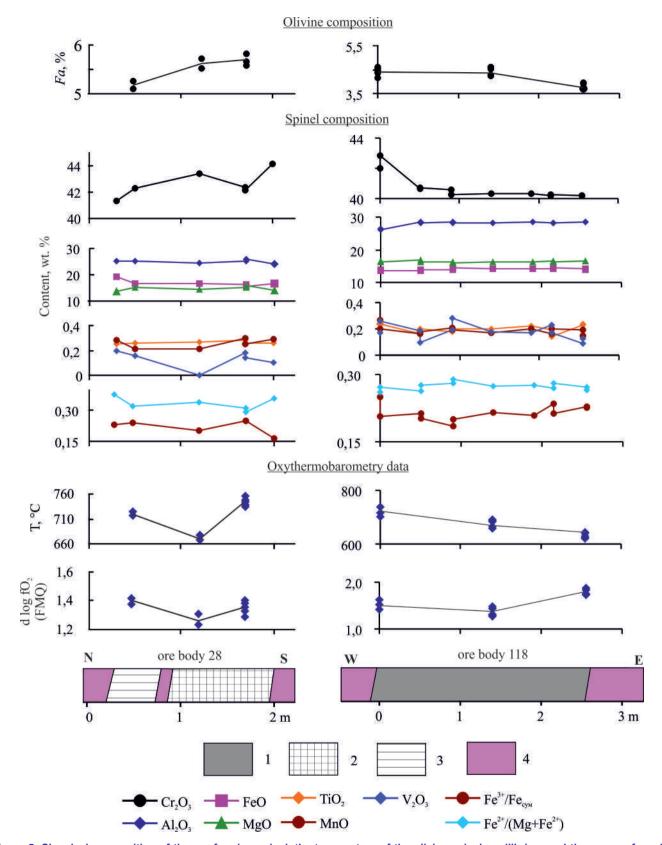


Figure 5. Chemical composition of the ore-forming spinel, the temperature of the olivine-spinel equilibrium and the oxygen fugacity within the chromitite bodies 28 and 118 in the Yambotyvissky area. 1-3 is chromitite structure in terms of the content of ore-forming spinel: 1 – solid; 2 – densely disseminated; 3 – medium disseminated; 4 – dunites.

Рисунок 5. Изменение химического состава рудообразующей шпинели, температуры оливин-шпинелевого равновесия и фугитивности кислорода внутри тел хромититов 28 и 118 Ямботывисской площади. 1—3 — структура хромититов по содержанию рудообразующей шпинели: 1 — сплошные, 2 — густовкрапленные; 3 — средневкрапленные; 4 — дуниты.

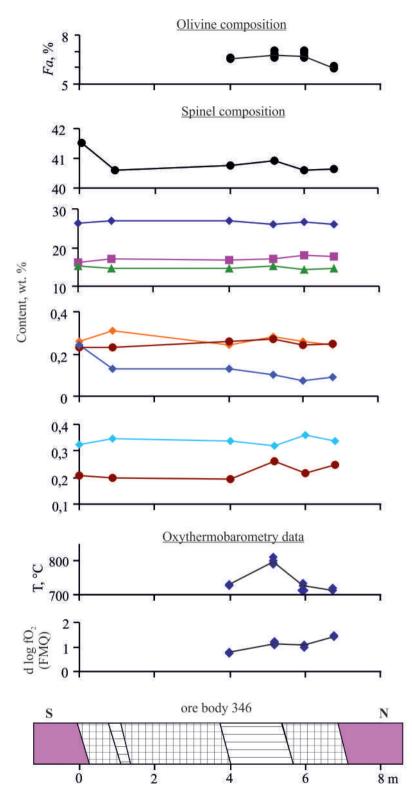


Figure 6. Chemical composition of the ore-forming spinel, the temperature of the olivine-spinel equilibrium and the oxygen fugacity within the chromitite body 346 of the Yambotyvissky area. The legend keys are shown in Figure 5. Рисунок 6. Изменение химического состава рудообразующей шпинели, температуры оливин-шпинелевого равновесия и фугитивности кислорода внутри тела хромититов 346 Ямботывисской площади. Условные обозначения см. на рисунке 5.

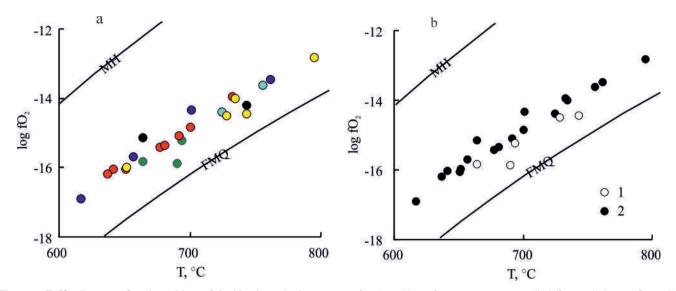


Figure 7. T–fO₂ diagrams for chromitites of the Yambotyvissky area. a – for chromitites of ore occurrences studied (for symbols, see figure 2). b – different impregnations: 1 – poorly and rarely disseminated; 2 – from moderately disseminated to massive.

Рисунок 7. Диаграммы Т–fO₂ для хромититов Ямботывисской площади. а – для хромититов изученных рудопроявлений (условные обозначения см. на рисунке 2); б – различной вкрапленности: 1 – убого- и редковкрапленные; 2 – от средневкрапленных до сплошных.

Within the range of ore occurrences 28, 118 and 346, there was an increase in the content of Cr_2O_3 to one of the contacts (Fig. 5, 6) by 1 wt.% (occurrences 346) and about 3 wt.% (occurrences 118 and 28). All these were accompanied by a decrease in the content of Al_2O_3 and Fe#. According to the content of divalent cations the most pronounced zonality is observed at the ore occurrence 28 where ferruginosity of spinel to its contacts increases. On the contrary, in the chromitite bodies of ore occurrences 118 and 346 the most ferruginous spinels are localizes in the inner parts of the ore deposits.

Ferruginosity (Fa = Fe / (Fe + Mg)) of olivine within the studied chromitite bodies varies slightly (within 0.7%) and increases to one of the contacts simultaneously with the amount of Cr_2O_3 in the spinel. The content of the fayalite molecule within one sample varies by 0.5%, that may be due to the existence of the chemical zonality of the mineral.

Oxythermobarometry of chromitites of the Yambotyvissky area

The oxygen fugacity and temperature of the olivine-spinel equilibrium were calculated using a Ballhaus-Berry-Green geothermometer and oxybarometer [12, 13] (Ballhaus et al., 1990, 1991). The calculated temperatures vary in the range of 600–795 °C within separate ore deposits.

In general, the lowest fO_2 values in the Yambotyvissky area are estimated (Fig. 7, a) in chromitites of 346 and 24 occurrences (0.6–1.5 units above the FMQ buffer). The highest oxygen fugacity is determined in chromitites of 28, 118 and 118a occurrences (FMQ + 1.5. + 1.9 units). Poorly and rarely disseminated chromitites are more reduced than the moderately disseminated, densely disseminated and massive ones (Fig. 7, b). This illustrates the increase in chrome spinel amount in chromitite with an increase in fO_2 in the ore body of 346 occurrence (Fig. 6).

Chromitites of the internal parts of the ore bodies are less oxidised compared with the end-contact parts (Fig. 5, 6). From the centre of the ore body to the host rocks fO₂ increases by 0.2–0.6 units. The temperature of the olivine-spinel equilibrium, determined near the contacts of the ore bodies, is higher than in the internal parts.

In the ore body 346, an increase in amount of chrome spinel impregnation from the centre to the northern end contact is observed. The structure of chromitite varies from rarely disseminated and moderately disseminated to densely disseminated. At the same time, the value of fO₂ rises from 0.8–1.4 logarithmic units above FMQ buffer.

Conclusion

The Yambotyvissky area chromitites are localised both in the rocks of the dunite-harzburgite complex and in the dunite bodies. Chromitites occurring in large dunite bodies (occurrences 24 and 25) are distinguished by lower Cr content in spinel. They are characterised by a somewhat lower Fe# in spinel. The difference in Fe# spinel from chromitites of the dunite-harzburgite complex and dunite bodies is insignificant and corresponds to the difference in oxygen fugacity of 0.1-0.2 logarithmic units. This value is within the error of the method (0.4 logarithmic units [13]) and the change in fO, within the area does not depend on the petrographic composition of the host rocks. There is another regularity: with the oxygen fugacity rising, the spinel amount in chromitite increases. This is clearly manifested in chromitite body 346. Another example is the studied chromitite occurrences of 24 and 25, which occur in the same dunite body and consist of chrome spinels of a similar composition. They differ in structure: rarely disseminated in occurrence 24 and densely disseminated to massive in occurrence 25. The oxygen fugacity determined for chromitites of occurrence 25 is statistically higher than for the occurrence of chromium ore 24. The highest values of fO, are noted for occurrence 118, composed with massive and densely disseminated to massive chromitites. These facts indicate the existence of a relationship between the amount of the ore-forming mineral in chromitite with the change in oxygen fugacity during ore formation. We found a similar pattern in the high-chromium chromitites of the Ray-Iz massif [3, 9]. In this massif the greatest oxygen fugacity is found in densely disseminated chromitites of the Tsentralnoye, Zapadnoye and other deposits, and the smallest one in disseminated-banded and rarely disseminated chrome ores of the Engayskoye, Yugo-Zapadnoye-2 and Yugo-Zapadnoye-3 ore occurrences.

Oxygen fugacity in all the investigated ore occurrences in the Yambotyvissky area increases to ore bodies contacts (by 0.2–0.6 logarithmic units). In this case, the rising in fO_2 occurs independently of the change in the ore-forming mineral content in the ore and is apparently associated with retrograde metamorphism (similar with the formation of chrome spinel grain rims, for example [14, 15]).

The direct proportionality between ferruginosity of the coexisting olivines and chromite spinels of the studied Yambotyvissky area ore occurrences indicates the existence of equilibrium in the rock/ore system.

Acnowledgements

The studies were carried out with the partial support of the Russian Foundation for Basic Research, project No. 18-05-70016 (P. B. Shiryaev) and the Complex Program of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, project No. 18-5-5-32 (N. V. Vakhrusheva).

REFERENCES

- 1. Chashchukhin I. S., Votyakov S. L., Shchapova Yu. L. 2007, *Kristallokhimiya khromshpineli i oksitermobarometriya ul'tramafitov skladchatykh oblastey* [Crystal chemistry of spinel and oxytermobarometry of ultramafites of folded regions]. Ekaterinburg, 310 p.
- 2. Garuti G., Pushkarev E. V., Thalhammer O. A. R., Zaccarini F. 2012, Chromitites of the Urals (Part 1): Overview of chromite mineral chemistry and geo-tectonic sitting. Ofioliti, vol. 37, no. 1, pp. 27–53. Google Scholar
- 3. Shiryaev B. P., Vakhrusheva N. V. 2009, Features of reducing-oxidizing state of chrome ores of the Ray-Iz and Voykaro-Syninsky (Polar Urals) massifs. Petrogenesis and ore formation. *Proceedings of the international conference XIV, readings in memory of A. N. Zavaritsky*. Ekaterinburg, pp. 234–237.
- 4. Shiryaev P. B. 2013, Deviation from stoichiometry of the compositions of the ore-forming chrome-spinels of high-chromium and alumina chromite of the Voykaro-Syninsky massif. *Annals-2012: works of the Institute of Geology and Geochemistry named after academician A. N. Zavaritsky*, vol. 160, pp. 183–187. https://elibrary.ru/item.asp?id=20234603
- 5. Morozov A. F. (ed.). 2006, Stroyeniye i dinamika litosfery Vostochnoy Yevropy. Rezul'taty issledovaniy po programme EUROPROBE [The structure and dynamics of the lithosphere of Eastern Europe. The results of studies according to the program EUROPROBE]. Moscow, 736 p. ISBN 5-89118-365-9.
- 6. Puchkov V. N. 2010, Geologiya Urala i Priural'ya (aktual'nyye voprosy stratigrafii, tektoniki, geodinamiki i metallogenii) [Geology of the Urals and Cisuralian area (current issues of stratigraphy, tectonics, geodynamics and metallogeny)]. Ufa, 280 p.
- 7. Savelieva G. N., Batanova V. G., Berezhnaya N. G., Presnyakov S. L., Sobolev A. V., Skublov S. G., Belousov I. A. 2013, Polychronous formation of mantle complexes in ophiolites, the Polar Urals. *Geotectonics*, vol. 47 (3), pp. 167–179. https://doi.org/10.1134/S0016852113030060
- 8. Vakhrusheva N. V. 1996, *Metamorfizm khromitonosnykh giperbazitov Polyarnogo Urala* [Metamorphism of chromite-bearing hyperbasites of the Polar Urals]: PhD thesis of the candidate of geological and mineralogical sciences. Ekaterinburg, 24 p.
- 9. Vakhrusheva N. V., Shiryaev P. B., Stepanov A. E., Bogdanova A. R. 2017, Petrologiya i khromitonosnost' ul'traosnovnogo massiva Ray-Iz (Polyarnyy Ural) [Petrology and chromite-bearing of the ultramafic Rai-Iz massif (Polar Urals)]. Ekaterinburg, 265 p.
- 10. Irvine T. N. 1965, Chromian spinel as a petrogenetic indicator. Part 1: theory. *Canadian Journal of Earth Sciences*, vol. 2, issue 6, pp. 648–672. https://doi.org/10.1139/e65-046
- 11. Irvine T. N. 1967, Chromian spinel as a petrogenetic indicator. Part 2: petrologic applications. *Canadian Journal of Earth Sciences*, vol. 4, issue 1, pp. 71–103. https://doi.org/10.1139/e67-004
- 12. Ballhaus C., Berry R. F., Green D. H. 1990, Oxygen fugacity controls in the Earth's upper mantle. *Nature*, vol. 348(6300), pp. 437–440. https://doi.org/10.1038/348437a0
- 13. Ballhaus C., Berry R., Green D. 1991, High pressure experimental calibration of the olivine-orthopyroxene-spinel oxygen geobarometer: implication for the oxidation state of the upper mantle. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, vol. 107, issue 1, pp. 27–40. https://doi.org/10.1007/BF00311183
- 14. Bliss N. W., MacLean W. H. 1975, The paragenesis of zoned chromite from central Manitoba. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 39, issues 6–7, pp. 973–990. https://doi.org/10.1016/0016-7037(75)90042-3
- 15. Colás V., González-Jiménez J. M., Griffin W. L., Fanlo I., Gervilla F., O'Reilly S. Y. 2014, Fingerprints of metamorphism in chromite: New insights from minor and trace elements. *Chemical Geology*, vol. 389, 11 December, pp. 137–152. https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2014.10.001

The article was received on September 13, 2018

https://doi.org/10.21440/2307-2091-2018-4-33-40

УДК 549.514.81+550.93(470.5)

Окислительно-восстановительное состояние хромититов Ямботывисской площади Войкаро-Сыньинского массива (Полярный Урал)

Павел Борисович ШИРЯЕВ^{1, 2, *}. Надежда Владимировна ВАХРУШЕВА^{1, 2, **}

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

Актуальность работы обусловлена слабой изученностью окислительно-восстановительного состояния хромититов Войкаро-Сыньинского массива. **Шель работы** состоит в том, чтобы установить закономерности изменения окислительно-восстановительных условий в процессе образования хромититов глиноземистого химического типа, развитых в пределах Ямботывисской площади.

Методология исследования: изучение составов рудообразующих хромовых шпинелей и оливинов из хромититов Ямботывисской площади; оценка температуры оливин-шпинелевого равновесия и фугитивности кислорода в образцах хромититов; изучение изменения составов минералов и Т-Ю, параметров в пределах площади в целом и внутри отдельных рудных тел.

Результаты работы. Изучены особенности состава рудообразующих хромовых шпинелей и окислительно-восстановительное состояние хромититов Ямботывисской площади Войкаро-Сыньинского массива. Показано, что рудообразующие шпинели рудопроявлений, залегающих в дунитах, менее хромисты по сравнению с хромовыми шпинелями руд, локализованных в гарцбургитах. Установлено, что железистости оливинов и шпинелей, слагающих хромититы площади, прямо пропорциональны, что указывает на существование равновесия в системе порода/руда. Изучено изменение химического состава рудообразующих хромовых шпинелей, температуры оливин-шпинелевого равновесия и фугитивности кислорода в пределах отдельных рудных тел. Фугитивность кислорода возрастает от внутренних частей тел хромититов по направлению к их эндоконтактам. Показано, что в глиноземистых хромититах повышение фугитивности кислорода коррелирует с увеличением густоты вкрапленности хромовой шпинели в руде. Хромититы, залегающие в телах дунитов и в гарцбургитах, образовались при близких окислительно-восстановительных условиях. Проведено сравнение полученных данных с результатами исследования состава минералов и окислительно-восстановительного состояния хромовых руд массива Рай-Из.

Ключевые слова: редокс-состояние, хромититы, ультрамафиты, Войкаро-Сыньинский массив, метаморфизм, рудообразование

Исследования проведены при частичной поддержке РФФИ, проект № 18-05-70016 (П. Б. Ширяев) и Комплексной программы УрО РА \hat{H} , проект \hat{N} 18-5-5-32 (H. В. Вахрушева).

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Чащухин И. С., Вотяков С. Л., Щапова Ю. Л. Кристаллохимия хромшпинели и окситермобарометрия ультрамафитов складчатых
- областей. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2007. 310 с. 2. Garuti G., Pushkarev E. V., Thalhammer O. A. R., Zaccarini F. Chromitites of the Urals (Part 1): Overview of chromite mineral chemistry and geo-tectonic sttting // Ofioliti. 2012. Vol. 37, №1. P. 27-53. Google Scholar
- 3. Ширяев Б. П., Вахрушева Н. В. Особенности окислительно-восстановительного состояния хромовых руд массивов Рай-Из и Войкаро-Сынинский (Полярный Урал) // Петрогенезис и рудообразование: материалы междунар. конф. XIV Чтения памяти А. Н. Заварицкого. Екатеринбург: ИГГ УрО PAH, 2009. C. 234-237.
- 4. Ширяев П. Б. Отклонение от стехиометрии составов рудообразующих хромшпинелей высокохромистых и глиноземистых хромититов Войкаро-Сынинского массива // Ежегодник-2012: труды Ин-та геологии и геохимии им. акад. А. Н. Заварицкого. 2013. Вып.160. С. 183-187. https://elibrary.ru/item.asp?id=20234603
- 5. Строение и динамика литосферы Восточной Европы. Результаты исследований по программе EUROPROBE / под ред. А. Ф. Морозова). М.: ГЕОКАРТ; ГЕОС, 2006. 736 с. ISBN 5-89118-365-9.
- 6. Пучков В. Н. Геология Урала и Приуралья (актуальные вопросы стратиграфии, тектоники, геодинамики и металлогении). Уфа: Дизайн Полиграф Сервис, 2010. 280 с.
- 7. Savelieva G. N., Batanova V. G., Berezhnaya N. G., Presnyakov S. L., Sobolev A. V., Skublov S. G., Belousov I. A. Polychronous formation of mantle complexes in ophiolites, the Polar Urals // Geotectonics. 2013. Vol. 47 (3). P. 167–179. https://doi.org/10.1134/S0016852113030060
- 8. Вахрушева Н. В. Метаморфизм хромитоносных гипербазитов Полярного Урала: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Екатеринбург, 1996. 24 с.
- 9. Вахрушева Н. В., Ширяев П. Б., Степанов А. Е., Богданова А. Р. Петрология и хромитоносность ультраосновного массива Рай-Из (Полярный Урал). Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2017. 265 с.
- 10. Irvine T. N. Chromian spinel as a petrogenetic indicator. Part I: theory // Canadian Journal of Earth Sciences. 1965. Vol. 2(6). P. 648-672. https://doi.org/10.1139/e65-046
- 11. Irvine T. N. Chromian spinel as a petrogenetic indicator. Part 2: petrologic applications // Canadian Journal of Earth Sciences. 1967. Vol. 4. P. 71-103. https://doi.org/10.1139/e67-004
- 12. Ballhaus C., Berry R. F., Green D. H. Oxygen fugacity controls in the Earth's upper mantle // Nature. 1990. Vol. 348(6300). P. 437-440. https://
- 13. Ballhaus C., Berry R., Green D. High pressure experimental calibration of the olivine-orthopyroxene-spinel oxygen geobarometer: implication for the oxidation state of the upper mantle // Contrib. Mineral. Petrol. 1991. Vol. 107. P. 27-40. https://doi.org/10.1007/BF00311183
- 14. Bliss N. W., MacLean W. H. The paragenesis of zoned chromite from central Manitoba // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1975. Vol. 39. P. 973-990. https://doi.org/10.1016/0016-7037(75)90042-3
- 15. Colás V., González-Jiménez J. M., Griffin W. L., Fanlo I., Gervilla F., O'Reilly S. Y. Fingerprints of metamorphism in chromite: New insights from minor and trace elements // Chem. Geol. 2014. Vol. 389. P. 137-152. https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2014.10.001

Статья поступила в редакцию 13 сентября 2018 г.

⊠ shiryayev@igg.uran.ru https://orcid.org/0000-0002-3090-6001

* vakhruscheva@igg.uran.ru

https://orcid.org/0000-0002-2790-8401

²Уральский государственный горный университет, Россия, Екатеринбург

УДК 553.982.2

О возможной максимальной глубине нахождения месторождений нефти

Кирилл Святославич ИВАНОВ

Институт геологии и геохимии УрО РАН, Екатеринбург, Россия

Актуальность исследований. Изучение природы нефти – это основополагающий вопрос в геологии, имеющий фундаментальное научное и практическое значение. В связи с постепенным исчерпанием месторождений малых и средних глубин (до 4,5 км) неизбежно встает вопрос об освоении более глубоких месторождений углеводородов.

Цель работы: оценить, до каких глубин в настоящее время возможно обнаружение нефтяных месторождений.

Методология исследования: анализ теоретических моделей неорганического образования нефти и глубинного строения земной коры с привлечением новых данных по экспериментам и мировым открытиям месторождений на сверхглубинах.

Результаты. Исходя из реологической модели строения континентальной земной коры С. Н. Иванова, наиболее глубокие месторождения нефти дожны располагаться сразу ниже отделителя, т. е. непосредственно под непроницаемой для флюидов границей, располагающейся обычно на глубине 10–11 км. По модели формирования нефти А. И. Малышева (модель охлаждаюших горизонтов) максимальные глубины для месторождений нефти составляют 12 км. Уже известны месторождения нефти с глубиной 10,7 км. Эксперименты В. С. Балицкого и других по фазовым состояниям водно-углеводородных флюидов при высоких температурах и давлениях показывают, что могут существовать месторождения нефти как минимум до 12 км. Эта же глубина является максимально достижимой бурением в настоящее время.

Выводы. Нахождение месторождений нефти возможно до глубины 12 км. Но из представлений о неорганической природе нефти никоим образом не следует необходимость и целесообразность поисков ее месторождений в фундаменте Западной Сибири и Ямала на обширных плошадях вне известных нефтеносных районов. Если бы там сушествовали значимые нефтеподводящие глубинные разломы, то нефть, благодаря ее легкости, должна была бы проявиться и в чехле. Поэтому первоочередной объект поисков – глубокие горизонты под крупными месторождениями нефти.

Ключевые слова: месторождения нефти, глубинное строение земной коры, флюиды.

ведение. Две гипотезы о природе нефти

Как известно, в настоящее время человечество живет в эпоху нефти, которая является основой благосостояния России. Наше страна все последние годы стабильно занимает 1–2-е место в мире по ее добыче наряду с Саудовской Аравией, при этом значительно отставая от нее по запасам, составляющим по разным оценкам около 260 и 60 млрд баррелей (бочек) соответственно. Это 1-е и 8-е места в мире [URL: http://www.ereport.ru/articles/commod/oilcount.htm и др.]. Изучение природы нефти – это основополагающий мировоззренческий вопрос в геологии, имеющий фундаментальное научное и практическое значение. Его невозможно решать без привлечения знаний о глубинном строении земной коры и мантии, данных по петрологии, экспериментальной минералогии, геофизике и др. [1–36 и др.].

Как известно, сейчас о происхождении нефти есть две основных гипотезы – осадочно-миграционная и глубинная неорганическая. Первая из них обстоятельно изложена в сотнях трудов, делать здесь обзор которых необходимости нет. Для целей этой статьи важно лишь отметить, что в настоящее время наметилось противоречие между «теорией» и «экспериментом» (т. е. между наукой и практикой), поскольку, в частности, был открыт ряд нефтяных месторождений ниже (глубже) так называемого «нефтяного окна», где, как считается в рамках этой гипотезы, только и может из органических остатков генерироваться нефть (нефтяное окно 50-150 °C, т. е. глубины, как правило, от 2,3 до 4,6 км; сразу ниже – газовое окно, 150–200 °C). «Никаким количеством экспериментов нельзя доказать теорию; но достаточно одного эксперимента, чтобы ее опровергнуть» (А. Эйнштейн). Впрочем, для поисков нефти в наиболее часто встречающемся типе ловушек – антиклинальном – никакой осадочно-миграционной гипотезы и не нужно, достаточно знать лишь закон всемирного тяготения, открытый Ньютоном 350 лет назад, и удельный вес воды и нефти.

Гипотеза глубинного происхождения нефти берет начало с работ Д. И. Менделеева и П. Бертло и развивалась учеными России, Украины, США и др. [5-7, 12-14, 16, 17, 19, 21-23, 29, 30 и мн. др.]. Эта концепция основана на представлениях о том, что образование углеводородов (УВ) происходит в мантийных очагах вследствие неорганического синтеза. Образовавшиеся в мантии Земли УВ по глубинным разломам проникают в земную кору, где и образуют нефтегазовые месторождения. Анализ геологического строения гигантских месторождений УВ показывает, что путями крупномасштабной углеводородной дегазации мантии Земли являются преимущественно окраинные и внутренние рифты океанических и континентальных литосферных плит и другие зоны глубинных разломов фундамента осадочных бассейнов [6, 12, 13, 19 и др.].

В последнее время в пользу представлений о глубинном происхождении нефти получены новые факты. Система Н-С, которой является природная нефть, метастабильна. При низких давлениях все тяжелые УВ нестабильны по отношению к метану и стехиометрическому количеству водорода. Метан не полимеризуется в тяжелые УВ при низких давлениях и любых температурах. Наоборот, увеличение температуры при низких давлениях увеличило бы скорость разложения тяжелых углеводородных молекул [23 и др.]. Поскольку химические потенциалы всех биотических молекул лежат намного ниже химического потенциала метана, постольку никакая УВ молекула тяжелее метана не самообразуется из любых биотических молекул. И термодинамические расчеты, и эксперименты показали, что для синтеза углеводородных систем, сходных по составу с природными, необходима температура 700–1800 К и давление 15–80 кбар [14 и др.]. Такие условия существуют в верхней мантии Земли на глубинах 50–240 км. Экспериментальные работы последних лет, проведенные российскими, американскими, западноевропейскими и китайскими учеными [30, 31 и др.], показали возможность абиогенного синтеза углеводородов в глубинных (мантийных) условиях. Полученные результаты свидетельствуют о том, что из неорганических компонентов при высоких давлениях и температурах, сходных с термобарическими условиями верхней мантии Земли, синтезируется смесь углеводородов, сходная по своему составу с природной нефтью.

Количество синтезированных тяжелых УВ возрастает при увеличении давления. Таким образом, тяжелые углеводородные молекулы, присутствующие в нефти, являются маркерами высоких давлений ее генерации.

Если нефть образовалась в мантии, сложенной, как известно, преимущественно ультраосновными породами, то логично предположить, что взаимодействие нефти и ультрамафитов должно отразиться на ее микроэлементном составе. Изучение неорганической геохимии нефти Западной Сибири и Татарстана методом ICP-MS показывает, что нефти обладают крайне специфическим микроэлементным составом, не присущим более никаким другим веществам Земли [22 и др.]. Главная геохимическая особенность нефти заключается в предельно низких содержаниях большинства микроэлементов. На диаграммах нормированных содержаний РЗЭ заметной чертой их распределения в нефтях является преобладание легких лантаноидов над средними и тяжелыми (La/Yb = 16–19). Важной чертой нефти является ярко выраженная положительная европиевая аномалия, характерная для глубинных образований. Содержания в нефтях Сs, Rb, Sr, Zr и платиноидов вполне сопоставимы с их концентрациями в ультрабазитах. На основании повышенных содержаний Ni, Co, Cr, V и др. также был сделан вывод об «ультрабазитовой» геохимико-металлогенической специализации нефти [16, 22 и др.] и поддержано предположение о ее глубинном происхождении.

Нами совместно с коллегами из Института органического синтеза УрО РАН [7] была проведена серия экспериментов по массопереносу органических соединений из образцов битуминозных аргиллитов баженовской свиты Северо-Покачевского, Южно-Ягунского и Тевлинско-Русскинского месторождений нефти Западной Сибири в синтезированные УВ и минерализованные термальные воды. Показано, что присутствие биомаркеров (УВ, сохранивших характерные черты исходных биоорганических соединений) в природных нефтях не является бесспорным доказательством органического происхождения нефти (как это рассматривается сторонниками органической, осадочно-миграционной гипотезы происхождения нефти), а вполне может быть приобретено исходно глубинными УВ при миграции через осадочные породы, содержащие органическое вещество.

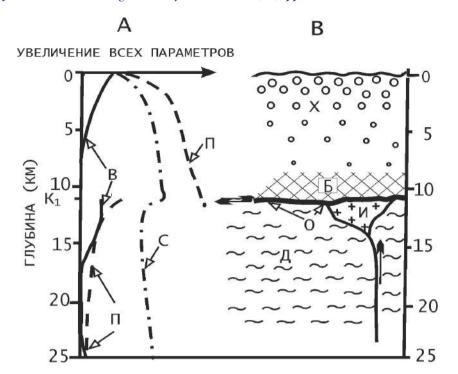
Есть научный и практический смысл в попытке оценить, до каких же глубин в настоящее время возможно обнаружение нефтяных месторождений. Коль скоро уже абсолютно понятно, что они могут располагаться и глубже 4,5–5 км, которыми ограничивала их распространение осадочно-миграционная парадигма, т. е. глубже так называемого «нефтяного окна» этой гипотезы образования нефти. Оценку попробуем дать, используя модели разных авторов как условно равноценные – для некоторого «усреднения» и большей объективности.

Реологическая модель строения континентальной земной коры С. Н. Иванова и ее роль для нефтяной геологии С. Н. Ивановым была предложена гидродинамическая, она же реологическая зональная модель земной коры с почти непроницаемой для трещинно-поровых вод и флюидов зоной между верхней и средней корой [8–10, 27 и др.]. Суть модели заключается в следующем. В консолидированной коре материков трещины и открытые поры (далее ТПП – трещинно-поровое пространство) в твердых породах под «гидростатической» зоной свободного стока закрываются на глубине 7-15 км в зависимости от состава и прочности пород, а также температуры (чаще всего на глубине около 10-11 км). Закрытие (закупоривание) ТПП приводит к созданию «барьерной» для флюидов зоны, под которой последние находятся под литостатическим давлением в «литостатической» зоне. Высокое литостатическое давление вод в ТПП обусловливает по закону эффективного давления Терцаги потерю горными породами упрочнения, вызванного большим всесторонним давлением. Создается ослабленная верхняя часть литостатической зоны, в которой легко развиваются пластические (псевдопластические и истинно пластические) и хрупко-пластические деформации, способствующие продвижению глубинных флюидов путем гидроразрыва. При поступлении из более глубоких метаморфических зон дегидратации глубинных высоконапорных флюидов они частично концентрируются под барьерной зоной и при наличии их гидравлической связи с глубинными очагами кратковременно прорывают барьерную зону, оставляя на путях разгрузки давления обильную жильную минерализацию, в том числе и рудную. Закрытие прорыва осуществляется благодаря падению давления, ведущему к быстрому минералообразованию по закону Джоуля-Томсона.

Ослабленная, частично обводненная верхняя часть литостатической зоны на границе с «сухой», более прочной барьерной зоной служит неизбежным местом тектонических разрывов – образованием «отделителя», отделяющего реологически различные толщи даже при самых малых тектонических подвижках. Отделитель отмечается сейсмикой во многих регионах материков Земли как граница K_1 (или F у некоторых западных исследователей). Наиболее ясно она выявляется в крупных регионах растяжения литосферы.

Получены подтверждения нашей зональной модели распределением в земной коре рудных гидротермальных месторождений, выявлением глубинных зон электропроводимости, размещением очагов землетрясений и другими данными, а также непосредственным вскрытием сверхглубокими скважинами СГ-3 (Кольская), КТБ (Немецкая), Гравберг (Шведская). Благодаря приподнятости Балтийского щита, СГ-3 пересекла вертикальную палеозональность. Она последовательно вскрыла гидростатическую, затем барьерную, затем следы отделителя, затем литостатическую частично обводненную зону с высоким литостатическим давлением флюида в ТПП. Немецкая скважина КТБ тоже подтвердила реологическую зональность и была закрыта при входе в верхи литостатической зоны вследствие самопроизвольного сужения ствола скважины, препятствующего бурению (рисунок).

Отделитель отграничивает зону хрупких деформаций – сбросов, сдвигов, тектонических брекчий и других хрупких проявлений тектоники от расположенной ниже зоны в основном пластичных деформаций. Это хорошо задокументировано в различных областях Земли (провинция бассейнов и хребтов на западе Северной Америки, каледониды Скандинавии и др.). Отделитель является крайне слабым швом внутри земной коры, и по нему в первую очередь разряжаются все последующие тектонические напряжения. При тектонической денудации верхней части земной коры и (или) изменении теплового потока в процессе деформации коры зона отделителя мигрирует и накладывается на верхнюю (или подстилаю-



Упрощенная схема строения верхней и средней континентальной земной коры. А – изменение с глубиной: П – прочности гранитных пород, С – скорости распространения сейсмических волн, В – содержания воды в трещинах и порах.

В – главные элементы строения континентальной земной коры: X – хрупкая зона верхней коры со снижением содержания флюидов вниз по разрезу, Б – плотная сухая барьерная зона, О – отделитель, Д – водосодержащая зона с преобладанием пластических деформаций, И – интрузия путем гидроразрыва суперкритического водного флюида или магмы.

The simplified scheme of the upper and middle continental structure of the Earth crust. A – changing with depth: Π – of granite rock strength, C – of seismic wave distribution rate, B – fissure-pore water content. B – main structure features of the Earth's crust upper part: X – brittle zone of the upper crust with decrease of fluids downwards, B – dense 'dry' barrier zone, D – otdelitel' (detachment fault), D – aquiferous zone with prevalence of plastic deformations, D – intrusion of supercritical water fluid or magma by the way of hydrobreak.

щую) зону. Изучая наложение хрупких структур на пластические (или наоборот), можно получить существенные данные о тектонической эволюции региона.

В понимании глубинной гидрогеологии и нефтяной геологии значение зоны отделителя является определяющим. Поверхностные воды в свободном состоянии не могут проникать ниже зоны отделителя, выше которой нередко отмечаются залежи рассолов. С зоной отделителя связано образование многих элизионных режимов с высоконапорными водами. Частая приуроченность месторождений углеводородов к областям повышенных флюидных давлений позволяет предполагать их исходную концентрацию, еще не вскрытую бурением, ниже зоны отделителя. В принципе, это предположение могло бы быть проверено не только сверхглубоким бурением в зонах многоэтажного нефтепроявления, но и вне этих зон, замерами естественного флюидного давления и при искусственном гидроразрыве в сверхглубоких скважинах.

Таким образом, в соответствии с реологической моделью строения континентальной земной коры С. Н. Иванова наиболее глубокие нефтяные месторождения могут быть расположены непосредственно ниже отделителя, т. е. сразу ниже 10–11 км (в редких случаях – 15 км).

Оценка максимальных глубин месторождений нефти по модели «охлаждающих горизонтов» А. И. Малышева

В недавней интересной работе А. И. Малышева [15] было показано, что на контакте восходящих из глубины флюидных потоков с охлаждающими горизонтами вследствие охлаждения происходит массовый сброс вещества из газовой фазы в конденсат с протеканием химических реакций естественного углеводородного синтеза (ЕУС). Первичный ЕУС протекает за счет простейших постмагматических флюидных соединений (H_2 , CO_2 , H_2 S) и обусловлен гетерогенными реакциями в условиях конденсации (по мере приближения флюидного потока к земной поверхности) сначала H_2 S, а затем CO_2 . Возможность образования конденсатов определяется критическими температурами веществ, входящих в состав газовой смеси. Поэтому процесс образования конденсатов в эндогенных условиях контролируется, прежде всего, температурным профилем вмещающих пород на пути движения газовой смеси.

В первичном ЕУС А. И. Малышев [15] выделяет несколько наиболее важных критических глубин для образования нефти. Так, образование сероводородного конденсата начинается при температуре 100,4 °C. При среднем значении температурного градиента 30°/км движущаяся к поверхности эндогенная газовая смесь входит в зону конденсации сероводорода на вероятной глубине 3,2 км. Постмагматические газовые смеси при таких условиях представлены, как правило, H_2 S, CO_2 и H_2 с незначительными количествами CH_4 . При температурах, превышающих критическую температуру H_2 S, в составе газовых смесей может быть любое количество сероводорода, но в момент достижения критической температуры содержание H_2 S скачкообразно ограничивается его предельным парциальным давлением и происходит массовый сброс всего избытка H_2 S в конденсат. При фильтрации газообразного CO_2 через конденсат H_2 S протекают реакции EУС:

$$4H_{2}S_{(\texttt{xt})} + CO_{2(\texttt{r})} = CH_{4(\texttt{r})} + 2H_{2}O_{(\texttt{xt})} + 4S_{(\texttt{pom6})};$$

$$7H_2S_{(x)} + 2CO_{2(r)} = C_2H_{6(r)} + 4H_2O_{(x)} + 7S_{(pom6)}$$
 и т. д.

Таким образом, последовательное достижение эндогенными флюидами критических температур H_2 S и CO_2 приводит к интенсивному синтезу УВС. Эти специфические условия А. И. Малышев рассматривает как своеобразные ловушки, обусловливающие возникновение концентраций углеводородов в эндогенных условиях, – ловушки критических температур H_2 S и CO_2 . Эндогенные летучие по мере перемещения к поверхности Земли транспортируют с более глубоких горизонтов их повышенные давление и температуру. При встрече флюидных потоков с охлаждающим горизонтом, обладающим высокими теплоемкостью и теплопроводностью, возникает еще один тип температурных ловушек, имеющих большое значение для образования запасов углеводородного сырья в условиях Арктики.

Для вторичного ЕУС первым же и наиболее глубоким охлаждающим горизонтом на пути флюидов из глубин Земли оказывается геохимический барьер, связанный с критической температурой воды (374 °C). Этой температуры флюидный поток при среднем геотермическом градиенте достигает на глубине ~12,3 км. В момент охлаждения до этой температуры происходит массовый сброс в конденсат всех избыточных паров воды, формирование теплопроводного охлаждающего горизонта и конденсация УВС. Благодаря вторичному ЕУС под воздействием водных охлаждающих горизонтов формируются наиболее глубоко залегающие нефтяные месторождения.

Таким образом, для формирования отложений углеводородного сырья имеют глобальное значение P-T ловушки критических температур H₂O, H₂S и CO₂, тогда как локальные условия формирования концентраций углеводородного сырья обусловливаются воздействием охлаждающих горизонтов. Итак, **наибольшая возможная глубина генерации и нахождения месторождений нефти составляет, по модели А. И. Малышева** [15], **около 12 км.**

О чем свидетельствует практика современных нефтепоисковых работ?

В последние годы сделан ряд сенсационных открытий крупных нефтяных месторождений на максимальных глубинах. Принципиально важным является открытие богатых залежей нефти в Мексиканском заливе на глубинах 8,8–10,5 км, пластовые температуры на которых достигали 280–290 °C [3, 12, 25 и др.]. В 2009 г. на площади Тайбер в Мексиканском заливе на глубине 10,5 км (максимальной из всех выявленных на больших глубинах месторождений) открыто крупнейшее нефтяное месторождение с предварительно оцененными запасами 400–550 млн т нефти. Продуктивны палеоценовые отложения. В ранее открытом нефтяном месторождении Каскида продуктивны те же отложения (глубина 9750 м, глубина водного слоя 1770 м, запасы – более 400 млн т). В палеоценовых отложениях здесь открыто 18 месторождений нефти на сверхглубинах. Нефтегазоносный комплекс, представленный песчаниками с высокими коллекторскими свойствами, характеризуется аномально высокими пластовыми давлениями. Это крупная зона нефтегазонакопления на сверхглубинах [32 и др.]. Всего выявлено 55 месторождений УВ с запасами 5,5 млрд т в нефтяном эквиваленте, из них 10 нефтяных месторождений глубже 9 км (таблица).

В провинции Сантос (Бразилия) в 2008 г. найдено месторождение Тьюпи. С учетом водного слоя (2 км) продуктивные песчаные горизонты залегают на глубине 5 км и более. Предварительно оцененные запасы (по 15 пробуренным скважинам) – 680–960 млн т нефти. Предполагается, что Тьюпи является составной частью крупной зоны нефтегазонакопления – 800 км на 200 км. В 2008 г. на бразильском шельфе Атлантики было найдено крупнейшее месторождение Кариока Шугар Лоуф. Предварительно оцененные извлекаемые запасы нефти составляют 5,7 млрд т, геологические – 11 млрд т, глубина залегания продуктивных горизонтов – свыше 5500 м. Приведенные данные свидетельствуют о возмож-

Сверхглубокие нефтяные месторождения Мексиканского залива (по данным [3, 12, 25 и др.]. Superdeep oilfields of the Gulf of Mexico (according to the data [3, 12, 25 et al]).

Месторождение	Глубина, м	Запасы, млн т
Тонга Уэст	7832,5	27,5
Чингиз Хан	8003	_
Озона Дип	8037	17
Каскад	8082-7732	_
К-2 Норт	8144	14
Мэнса	8320	28,5
Шеньцзы	8320	55
Чинук	8433	_
Пэтфайндер	8540	_
Гейдельберг	8692,5	14
Стоунс	8711	_
Джек	8845	68,5
Дэс Бамп	8862	<u>-</u>
Сен-ало/Дэйна Пойнт	8862	_
Ганфлинт	8930	-
Бакскин	8968	-
Фрисиэн	8971	-
Сизар	9065	27,5
Шенандоа	9150	685–2055
Джулия	9500	-
Кодяк	9501	-
Вито	9760	-
Пони	9897	68,5
Каскида	9912,5	475
Нотти Хэд	10 428	68,5
Дипуотер Хорайзн (аварийное)	10 500	550
Тайбер	10 692	475

ности существования нефтяной фазы УВ на сверхглубинах при высоких температурах и аномально высоких пластовых давлениях. Эти результаты геологоразведочных работ на нефть и газ нельзя однозначно трактовать, исходя из осадочно-миграционной гипотезы образования нефти. Они скорее подтверждают абиогенный синтез углеводородов нефти и ее сохранность при высоких температурах, чем «главную фазу» нефтеобразования, когда стадия катагенеза MK_3 (температуры не выше $150\,^{\circ}\mathrm{C}$) является предельной для существования нефти [3 и др.].

Эксперименты В. С. Балицкого с коллегами по изучению фазовых состояний водно-углеводородных флюидов при высоких температурах и давлениях и их значение

Приведенные фактические данные опровергают распространенную ранее точку зрения о невозможности нахождения на таких глубинах (т. е. существенно ниже так называемого «нефтяного окна») нефтяных месторождений, заострив издавна дискутируемый вопрос: а до каких собственно максимальных глубин и температур она может обнаруживаться в земных недрах?

Представляется, что на эти вопросы во многом отвечают опубликованные в 2015 г. результаты весьма представительных экспериментов. Они были проведены в Институте экспериментальной минералогии РАН (в г. Черноголовка) В. С. Балицким и другими при участии французских исследователей [1 и др.]. Ими вопросы возможных глубин и температур существования нефти выяснялись путем экспериментального изучения синтетических флюидных включений в кварце, выращенном в автоклавах в водно-нефтяных флюидах в широком диапазоне температур и давлений. В результате было показано, что сырая нефть, в случае превышения ее объема над водным раствором, при температурах 240–310 °C и давлениях, близких к давлениям насыщенного пара и выше, не обнаруживает никаких изменений. Но уже при температурах выше 320-330 °C нефть подвергается необратимым изменениям с выделением твердых битумов и газовых УВ, в основном СН,, обогащаясь легкими и средними нефтяными фракциями. В случае преобладания над водной фазой нефть при температурах 350–380 °C практически полностью переходит в СН, и твердые битумы, а при более высоких температурах – в метан и графит. Глубины нахождения залежей нефти в таких условиях, учитывая реальные геотермические градиенты нефтегазоносных провинций, не должны превышать 12–14 км. Когда же объем нефти уступает объему присутствующего водного раствора, повышение температуры приводит вначале к полному растворению в нем нефти и газовых УВ с образованием гомогенных, в том числе сверхкритических водно-углеводородных флюидов. Переход УВ нефти в подобное состояние сохраняет ее от деструкции с превращением в твердые битумы и углеводородные газы. В этом случае нефть сохраняется как таковая по крайней мере до 500 °C и может распространяться до глубин около 20–22 км [1]. Итак, наиболее осторожная (минимальная) оценка возможных глубин нахождения залежей нефти, исходя из экспериментов В. С. Балицкого с коллегами, составляет 12 км.

Современные технические возможности сверхглубокого бурения

Как известно, рекордная Кольская сверхглубокая скважина СГ-3 начала буриться в мае 1970 г. в кристаллических протерозойских породах Балтийского щита, где обнажаются комплексы фундамента Русской (Восточно-Европейской) платформы. Бурение с перерывами продолжалось до 1991 г., причем глубины 12 км удалось достигнуть к началу 1983 г. В июне 1979-го скважина побила рекорд в 9583 м, ранее принадлежавший нефтяной скважине Берта Роджерс (США, Оклахома). С тех пор СГ-3 стала самой глубокой скважиной в мире. Изначально планировалось пройти 15 км, но изза слишком высоких температур, а также технических и финансовых трудностей остановились на 12 262 м. Главными целями СГ-3 было изучение глубинного строения континентальной земной коры (здесь было достигнуто очень много важных научных результатов, еще не до конца осмысленных до сих пор), а также совершенствование буровых технологий. Для последнего во много раз (а вероятнее – во много десятков раз) эффективнее и дешевле было бы бурить эту скважину непосредственно во дворе завода «Уралмаш». Бурение было начато серийной буровой установкой «Уралмаш-4Э», которую применяли для бурения скважин при поиске и разведке месторождений нефти и газа. С глубины 7263 м бурение продолжили установкой «Уралмаш-15000». В настоящее время Кольская сверхглубокая полностью законсервирована. В 1997 г. СГ-3 была занесена в Книгу рекордов Гиннесса как «самое глубокое вторжение человека в земную кору» и является таковой до сих пор. Общая стоимость СГ-3 чрезвычайно велика, в открытой печати она не озвучивалась, но были указания, что «сопоставима с экспедицией на Луну».

СГ-3 была также и самой длинной скважиной в мире до 2008 г., когда ее обошла пробуренная под острым углом к поверхности земли нефтяная скважина ВD-04А. Эта скважина была пробурена компанией Transocean для Maersk Oil в Катаре, в нефтяном бассейне Аль-Шахин (Al-Shaheen) с целью геологической разведки. Общая длина ствола скважины составила 12289 м, а отметку в 12 км удалось пройти всего за 36 дней.

Начиная с 2003 г. была проведена целая серия работ по сверхглубокому бурению (но также – наклонных скважин) в рамках международного проекта «Сахалин-1» на мелком шельфе. В 2011 г. компанией Exxon Neftegas на месторождении Одопту была пробурена одна из наиболее длинных скважин в мире – 12 245 м, причем всего за 60 дней. Однако на этом рекорды не закончились. Скважина О-14 – еще одна из наиболее длинных эксплуатационных скважин в мире – не имеет аналогов по общей длине ствола – 13 500 м, а также является самой длинной горизонтальной скважиной – 12 033 м. Ее разработкой занималась НК «Роснефть», также входящая в консорциум проекта «Сахалин-1». Эта скважина была пробурена на месторождении Чайво. Для ее бурения использовалась буровая платформа «Орлан». Отметим и глубину по стволу сооруженной в 2013 г. в рамках этого же проекта скважины под номером Z-43, значение которой достигло отметки 12 450 м. В том же году этот рекорд был побит на Чайвинском месторождении – длина ствола Z-42 достигла 12 700 м. В 2014-м была закончена проходка скважины Z-40 (месторождение Чайво), которая до О-14 была самой длинной по стволу скважиной в мире – 13 000 м, а также обладала самым длинным горизонтальным участком – 12 130 м. Таким образом, к настоящему времени 8 из 10 самых протяженных в мире скважин находятся на месторождениях проекта «Сахалин-1».

Итак, «нефтяные» (часто – наклонные) скважины бурятся во много раз быстрее, чем СГ-3, не только благодаря развитию технологий, но и поскольку, в частности, проходка осуществляется, как правило, в существенно менее прочных породах и без полного отбора керна, применявшегося на СГ-3. **Глубина 12 км максимальна, но все же посильна для современных буровых установок.**

Где возможно (и где совершенно не нужно) искать глубинную нефть?

Кроме технической возможности, безусловно, наиглавнейшим фактором является коммерческая целесообразность поисков нефти на глубоких горизонтах, поскольку нефть – это не только горючая маслянистая жидкость, но и экономическая категория. В первом приближении решение этого вопроса должно определить – месторождения с какими запасами и скважины с какими дебитами будут рентабельны на тех или иных глубинах в районах с разной инфраструктурой. Это отдельная группа задач, выходящих за рамки данной статьи. Пока же необходимо отметить, что из представлений о неорганической природе нефти никоим образом не следует необходимость и целесообразность поисков ее месторождений в фундаменте Западной Сибири и Ямала (как, впрочем, и других нефтегазоносных бассейнов) на обширных площадях вне известных нефтеносных районов, как это излишне просто и оптимистично предлагают ряд деятелей науки и производства. Если бы там существовали значимые нефтеподводящие глубинные разломы, то нефть, благодаря ее легкости, должна была бы проявиться и в чехле (а как показывает история поисков нефти [11 и др.] – быть может, даже и на поверхности). Таким образом, основной вывод совершенно другой: представления о неорганической природе нефти обусловливают весьма высокую вероятность многоэтажности залежей в пределах ее месторождений, особенно крупных и суперкрупных. Поэтому первоочередными поисковыми объектами являются нижние горизонты осадочного чехла и фундамент в пределах нефтеносных полей, особенно крупных месторождений.

Выдающийся русский ученый-нефтяник Н. А. Кудрявцев отметил «закономерность в размещении залежей нефти и газа – многоэтажность их месторождений и приуроченность последних к определенным участкам земной коры, ограниченным глубинными разломами» [13 и др.]. Современные данные глубокого бурения подтверждают это положение. В России при доразведке месторождений открываются залежи на глубинах более 4 км, за счет чего увеличивается этажность нефтегазоносности ряда месторождений Тимано-Печорской, Северо-Кавказской, Западно-Сибирской и других нефтегазоносных регионов. Характерным является большой этаж нефтегазоносности (до 2–4 км) месторождений на больших глубинах, приуроченных к тектонически активным приразломным зонам, где возможны перетоки углеводородов из глубоких в верхние части разреза. Открытие крупных нефтяных месторождений в интервале глубин 8–10,5 км при высоких стадиях катагенеза (АК₁–АК₃), высоких температурах и аномальных пластовых давлениях расширяет глубинный интервал существования жидкой фазы УВ, повышает перспективы нефтеносности до глубин 10–12 км и заставляет пересмотреть существующие традиционные представления о процессах нефтегазообразования и нефтегазонакопления в земной коре. Приведенные данные свидетельствуют в пользу глубинного источника нефти и газа в земной коре [3, 6, 21 и др.].

Исходя из глубинного происхождения нефти, весьма важным является картирование разломов фундамента. По сути, уже сейчас развиваемые нами представления [5–7, 22 и др., а также 13, 21, 30 и др.] дают основания отказаться от такого, еще сравнительно недавно казавшегося незыблемым требования, как обязательное наличие «нефтематеринских толщ» в разрезе конкретного района для его промышленной нефтегазоносности.

Заключение

Итак, как ни странно (для геологии), получен непротиворечивый результат – все рассмотренные модели, результаты экспериментов и данные нефтепоискового бурения указывают, что нахождение месторождений нефти возможно до глубины 12 км. Осадочно-миграционная гипотеза образования нефти задавала этаж нефтеносности глубиной от 2,3 до 4,6 км. Представления о неорганической, глубинной природе нефти, заложенные еще величайшим ученым Д. И. Менделеевым, позволяют расширить диапазон нахождения месторождений нефти в 4 раза, до 12 км. Понятно, что осваиваться эти сверхглубины будут не сразу, а с постепенным увеличением глубины.

Но необходимо подчеркнуть, что из представлений о неорганической природе нефти никоим образом не следует необходимость и целесообразность поисков ее месторождений в фундаменте Западной Сибири и Ямала на обширных площадях вне известных нефтеносных районов. Если бы там существовали значимые нефтеподводящие глубинные разломы, то нефть, благодаря ее легкости, должна была проявиться и выше – в осадочном чехле. Поэтому первоочередной объект поисков – глубокие горизонты под крупными месторождениями нефти.

Таким образом, для реализации потенциала глубинных месторождений нефти весьма важны исследования доюрского фундамента Западной Сибири и Ямала в районах крупных нефтяных месторождений в стратиграфическом чехле. Необходимо картирование фундамента, изучение и выделение глубинных разломов и потенциальных коллекторов. Необходимо безоговорочно и без каких-либо дополнительных финансовых взносов безотлагательно отменить ограничения по глубине всех действующих лицензий. Следует развивать геолого-геофизические технологии, а также технологии глубокого бурения и снижать его стоимость.

Исследования проводятся в рамках проекта РФФИ № 18-05-70016 «Геологическое строение и эволюция кристаллического фундамента и рифтового комплекса полуострова Ямал и сопредельных территорий Арктической части Западно-Сибирского нефтегазоносного мегабассейна».

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Балицкий В. С., Балицкая Л. В., Пентелей С. В., Пиронон Ж., Баррес О. Экспериментальное изучение метаморфических превращений углеводородов в водном окружении при повышенных и высоких температурах и давлениях (в связи с выяснением форм и максимальных глубин нахождения нефти в земных недрах). 4-е Кудрявцевские чтения: материалы Всерос. конф. по глубинному генезису нефти. М.: ЦГЭ, 2015. С. 1–5.
- 2. Ваньян Л. Л., Хийндман Р. Д. О природе электропроводимости консолидированной коры // Физика Земли. 1996. № 4. С. 5–11.
- 3. Варламов А. И., Лоджевская М. И. Углеводородный потенциал глубокозалегающих отложений осадочного чехла нефтегазоносных бассейнов мира // Современное состояние теории происхождения, методов прогнозирования и технологий поисков глубинной нефти (1-е Кудрявцевские чтения): материалы Всерос. конф. М.: ЦГЭ, 2012. С. 1–3. Conference collection
- 4. Иванов К. С., Ерохин Ю. В. Неорганическая геохимия нефти Северной Евразии (по данным ICP- MS) // Всерос. конф. по глубинному генезису нефти. 5-е Кудрявцевские чтения: матер. конф. (17–19 окт. 2016 г.). М.: ЦГЭ, 2016. С. 1–4 (тезисы № 21).
- Иванов К. С. Сколько нефти надо добывать России? (открытое письмо Президенту России В. В. Путину) // Уральский геологический журнал. 2016. № 6. С. 3–10.

- 6. Иванов К. С., Кучеров В. Г., Федоров Ю. Н. К вопросу о глубинном происхождении нефти // Состояние, тенденции и проблемы развития нефтегазового потенциала Западной Сибири (17-19 сентября). Тюмень, 2008. С. 160-173.
- 7. Иванов К. С., Федоров Ю. Н., Петров Л. А., Шишмаков А. Б. Ó природе биомаркеров нефтей // ДАН. 2010. Т. 432, № 2. С. 227–231. URL: https://doi.org/10.1134/S1028334X1005017X
- 8. Иванов С. Н. Предельная глубина открытых трещин и гидродинамическая зональность земной коры // Ежегодник-1969. Свердловск: ИГГ УФАН СССР. 1970. С. 212-233.
- 9. Иванов С. Н. Непроницаемая зона на границе верхней и средней части земной коры // Физика Земли. 1999. № 9. С. 96–102.
- 10. Иванов С. Н., Иванов К. С. Реологическая модель строения земной коры (модель 3-го поколения) // Литосфера. 2018. № 4. С. 3–18.
- 11. История геологического поиска (к 50-летию открытия Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции) / под ред. В. И. Карасева и др. M.: Пента. 2003. 283 с.
- 12. Краюшкин В. А. Небиогенная природа гигантских газонефтенакоплений на континентальном склоне Мирового океана // Глубинная нефть. 2014. Т. 2. № 5. С. 739-751. URL:
- 13. Кудрявцев Н. А. Генезис нефти и газа. Л.: Недра. 1973. 216 с.
- 14. Кучеров В. Г., Бенделиани Н. А., Алексеев В. А., Кенней Дж. Ф. Синтез углеводородов из минералов при давлении до 5 ГПа // ДАН. 2002. T. 387, № 6. C. 789-792. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=29053767
- 15. Малышев А. И. Роль охлаждающих горизонтов в генезисе углеводородных месторождений // ДАН. 2017. Т. 476, № 4. С. 445–447. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=30150860
- 16. Маракушев А. А., Писоцкий Б. И., Панеях Н. А., Готтих Р. П. Геохимическая специфика нефти и происхождение ее месторождений // ДАН. 2004. T. 398, № 6. C. 795-799. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=17371839
- 17. Менделеев Д. И. Сочинения, Т. 10. Heфть, М.: Л.: Изд-во АН СССР, 1949, 832 с.
- 18. Павленкова Н. И. Петрофизические проблемы глобальной тектоники // Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле: 4-я тектонофиз. конф. в ИФЗ РАН с междунар. участием. 2016. С. 529-537. Conference collection
- 19. Порфирьев В. Б. Природа нефти, газа и ископаемых углей. Избр. труды. Т. 2. Абиогенная нефть. Киев: Наук. думка, 1987. 216 с.
- 20. Сокол А. Г., Томиленко А. А., Бульбак Т. А., Соболев Н. В. Синтез углеводородов при конверсии CO_2 флюида водородом: экспериментальное моделирование при 7,8 ГПА и 1350 °С // ДАН. 2017. Т. 477, № 6. С. 699–703. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=30752880
- 21. Тимурзиев А. И. Закономерности пространственно-стратиграфического распределения залежей нефти и газа Западно-Сибирской НГП на основе представлений об их глубинном генезисе, молодом возрасте и новейшем времени формирования // Горные ведомости. 2014. № 5 (120). C. 24-46. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=21577221
- 22. Федоров Ю. Н., Иванов К. С., Ерохин Ю. В., Ронкин Ю. Л. Неорганическая геохимия нефти Западной Сибири (первые результаты изучения методом ICP-MS) // ДАН. 2007. Т. 414, № 3. С. 385–388. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=9533485
- 23. Chekaliuk E. B., Kenney J. F. The stability of hydrocarbons in the thermodynamic conditions of the Earth // Proc. Amer. Phys. Soc. 1991. Vol. 36(3). 347 p.
- 24. Cruse A. M., Seewald J. S. Geochemistry of low-molecular weight hydrocarbons in hydrothermal fluids from Middle Valley, Northern Juan de Fuca Ridge // Geochim. Cosmochim. Acta. 2006. Vol. 70, issue 8. P. 2073-2092. https://doi.org/10.1016/j.gca.2006.01.015
- 25. Gulf of Mexico Waits For A Turnaround // World Oil. 2002. March. URL: https://www.worldoil.com/magazine/2002/march-2002/features/gulfof-mexico-waits-for-a-turnaround
- 26. Howard G. H., Barry P. H., Pernet-Fisher J. F., Baziotis I. P., Pokhilenko N. P., Pokhilenko L. N., Bodnar R. J., Taylor L. A., Agishev A. M. Superplume metasomatism: evidence from Siberian mantle xenoliths // Lithos. 2014. Vol. 184-187. P. 209-224. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2013.09.006
- 27. Ivanov S. N., Ivanov K. S. Hydrodynamic Zoning of the Earth's crust and its Significance // Journal of Geodynamics. 1993. Vol. 17, issue 4. P. 155-180. https://doi.org/10.1016/0264-3707(93)90006-R
- 28. Kaminsky F. V., Wirth R., Schreiber A. Carbonatitic inclusions in deep mantle diamond from Juina, Brazil: new minerals in the carbonate-halide association // The Canad. Miner. 2013. Vol. 51. P. 669-688. https://doi.org/10.3749/canmin.51.5.669
- 29. Kitchka A. Juvenile petroleum pathway: from fluid inclusions via tectonics and outgassing to its commercial fields // Геолог Украины. Наука: новый взгляд. 2004. № 2(6). С. 37–47.
- 30. Kolesnikov A., Kutcherov V., Goncharov A. Methane-derived hydrocarbons produced under upper-mantle conditions // Nature Geoscience. 2009. Vol. 2. P. 566-570. https://doi.org/10.1038/ngeo591
- 31. Mukhina E. D., Kolesnikov A. Yu., Serovaisky A. Yu., Kucherov V. G. Experimental Modelling Of Hydrocarbon Migration Processes // Journal of Physics: Conference Series. 2017. Vol. 950. P. 042040. URL: http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/950/4/042040/pdf 32. Operators report string of Gulf of Mexico discoveries // Oil & Gas Journal. 2009. Vol. 107, issue 7. P. 35.
- 33. Proskurowski G., Lilley M. D., Seewald J. S., Fruh-Green G. L., Olson E. J., Lupton J. E., Sylva S. P., Kelley D. S. Abiogenic hydrocarbon at Lost City hydrothermal field // Science. 2008. Vol. 319, issue 5863. P. 604–607. https://doi.org/10.1126/science.1151194
- 34. Shirey S. B., Cartigny P., Frost D. J., Keshav S., Nestola F., Nimis P., Pearson D. G., Sobolev N. V., Walter M. J. Diamonds and the geology of mantle carbon // Rev. Miner. Geochem. 2013. Vol. 75, issue 1. P. 355-421. https://doi.org/10.2138/rmg.2013.75.12
- 35. Sverjensky D. A., Stagno V., Fang Huang. Important role for organic carbon in subduction-zone fluids in the deep carbon cycle // Nature Geoscience. 2014. Vol. 7. P. 909–913. https://doi.org/10.1038/ngeo2291
- 36. Weiss Y., Kiflawi I., Davies N., Navon O. High-density fluids and the growth of monocrystalline diamonds // Geochim. Cosmochim. Acta. 2014. Vol. 141. 15 September. P. 145–159. https://doi.org/10.1016/j.gca.2014.05.050

Статья поступила в редакцию 17 июля 2018 г.

https://doi.org/10.21440/2307-2091-2018-4-41-49

УДК 553.982.2

About possible maximum depth of oil deposits

Kirill Svyatoslavich IVANOV

Institute of geology and geochemistry of the Ural branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

Relevance of research. The study of the origin of oil is fundamental in geology, with essential scientific and practical importance. In connection with the gradual exhaustion of deposits of small and medium depths (up to 4.5 km), the question inevitably arises of the development of deeper hydrocarbon deposits.

The purpose of the work: to estimate the depth to which it is currently possible to detect oil fields.

Methodology of the research: analysis of theoretical models of inorganic formation of oil and the deep structure of the earth's crust with the involvement of new data from experiments and global discoveries of deposits at super depths.

Results. Based on the rheological model by S. N. Ivanov (about the structure of the continental crust), the deepest oil fields should be located immediately below the separator, that is, directly under the fluid-tight boundary, usually at a depth of 10-11 km. According to the model of oil formation by A. I. Malyshev (model of cooling horizons), the maximum depth for oil fields is 12 km. Oil deposits with a depth of 10.7 km are already known. Tests by V. S. Balitsky and others on the phase states of water-hydrocarbon fluids at high temperatures and pressures show that there may be oil deposits of at least 12 km. Now, the same depth is maximally achievable when drilling.

Conclusion. Finding oil fields is possible to a depth of 12 km. However, the concept of the inorganic oil origin does not assume the necessity and expediency of searching for its deposits in the basement of Western Siberia and Yamal, over vast areas outside the known oil-bearing regions. If there were significant oil-bearing deep breaks there, then oil, due to its lightness, would appear in the mantle. Therefore, the primary object of exploration is deep horizons under large oil fields.

Keywords: oil fields, deep structure of the earth's crust, fluids.

Acknowledgements

The research is conducted under the scope of the project of Russian Foundation for Basic Research No. 18-05-70016 called "Geological structure and evolution of the crystalline basement and rift complex of the Yamal peninsula, as well as cross-border regions of the Arctic part of the West-Siberian oil-and-gas bearing megabasin.'

REFERENCES

- 1. Balitsky V. S., Balitskaya L. V., Penteley S.V., Pironon J., Barres O. 2015, Eksperimental'noye izucheniye metamorficheskikh prevrashcheniy uglevodorodov v vodnom okruzhenii pri povyshennykh i vysokikh temperaturakh i davleniyakh (v svyazi s vyyasneniyem form i maksimal'nykh glubin nakhozhdeniya nefti v zemnykh nedrakh) [Experimental study of metamorphic transformations of hydrocarbons in the water environment at elevated and high temperatures and pressures (in connection with the clarification of the forms and maximum depths of oil in the earth interior)]. 4th Kudryavtsev Readings: Proceedings of the All-Russian conference on the deep-seated oil genesis. Moscow, pp. 1-5.
- 2. Vanyan L. L., Hyndman R. D. 1996, On the Origin of Electrical Conductivity in the Consolidated Crust. Fizika Zemli [Izvestiya. Physics of the Solid Earth], no. 4, pp. 5-11. (In Russ.)
- 3. Varlamov A. I., Lodzhevskaya M. I. 2012, Uglevodorodnyy potentsial glubokozalegayushchikh otlozheniy osadochnogo chekhla neftegazonosnykh basseynov mira [Hydrocarbon potential of deep-seated sediments of the sedimentary mantle of the oil and gas basins] // Current state of the theory of origin, forecasting methods and deep oil exploration technologies (1st Kudryavtsev readings): Proceedings of the All-Russian conference. Moscow, pp. 1-3. http://conference.deepoil.ru/images/stories/docs/tema/017_Varlamov-Lodgevskaya_Theses1.pdf
- 4. Ivanov K. S., Erokhin Yu. V. 2016, Neorganicheskaya geokhimiya nefti Severnoy Evrazii (po dannym ICP-MS) [Inorganic geochemistry of oil of the Northen Eurasia (according to ICP- MS)]. All-Russian Conference on the deep genesis of oil. 5th Kudryavtsev Readings: Proceedings of the conference (October 17–19, 2016). Moscow, pp. 1–4.
- 5. Ivanov K. S. 2016, How much oil should Russia produce? (open letter to the President of Russia V. V. Putin). *Ural'skiy geologicheskiy zhurnal* [Uralian Geological Journal], no. 6, pp. 3–10. (In Russ.)
- 6. Ivanov K. S., Kucherov V. G., Fedorov Yu. N. 2008, To the question of the deep origin of oil. State, trends and problems of the development of the oil and gas potential of Western Siberia (September 17–19). Tyumen, pp. 160–173.
- 7. Ivanov K. S., Fedorov Yu. N., Petrov L. A., Shishmakov A. B. 2010, The nature of biomarkers in oils. Doklady Akademii nauk [Doklady Earth Sciences], vol. 432, no. 1, pp. 626-630.
- 8. Ivanov S. N. 1970, Predel'naya glubina otkrytykh treshchin i gidrodinamicheskaya zonal'nost' zemnoy kory [Extreme depth of open cracks and hydrodynamic zonality of the earth's crust]. Sverdlovsk, Yearbook-1969, pp. 212-233.
- 9. Ivanov S. N. 1999, Impermeable zone at the border of the upper and middle parts of the crust. Fizika Zemli [Izvestiya. Physics of the Solid Earth], no. 9, pp. 96–102. (*In Russ.*)
 10. Ivanov S. N., Ivanov K. S. 2018, Rheological model of the structure of the earth's crust (model of the 3rd generation). *Litosfera* [Lithosphere],
- 11. 2003, Istoriya geologicheskogo poiska (k 50-letiyu otkrytiya Zapadno-Sibirskoy neftegazonosnoy provintsii) [History of geological prospecting (to the 50th anniversary of the discovery of the West Siberian oil and gas province). Ed. by V. I. Karasev et al. Moscow, 283 p.
- 12. Krayushkin V. A. 2014, Nonbiogenic origin of giant gas and oil deposits in the continental slope of the World's water. Glubinnaya neft' [Deep oil], vol. 2, no. 5, pp. 739-751. (In Russ.)
- 13. Kudryavtsev N. A. 1973, Genezis nefti i gaza [Genesis of oil and gas]. Leningrad, 216 p.
- 14. Kucherov V. G., Bendeliani N. A., Alekseev V. A. J. Kenney. F. 2002, Synthesis of hydrocarbons from minerals at pressures up to 5 GPa. *Doklady Akademii nauk* [Doklady Earth Sciences], vol. 387, no. 6, pp. 789–792. (*In Russ.*) URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=29053767
- 15. Malyshev A. I. 2017, The role of cooling horizons in the genesis of hydrocarbon deposits. Doklady Akademii nauk [Doklady Earth Sciences], vol. 476, no. 4, pp. 445–447. (*In Russ.*) URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=30150860

 16. Marakushev A. A., Pisotskii B. I., Paneyakh N. A., Gottikh R. P. 2004, Geochemical features of oil and the origin of oil fields. *Doklady Akademii*
- nauk [Doklady Earth Sciences], vol. 398, no. 6, pp. 795-799. (In Russ.) URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=13463569
- 17. Mendeleev D. I. 1949, Sochineniya [Writings]. Tom 10. Neft' [Vol. 10. Oil]. Moscow; Leningrad, 832 p.
- 18. Pavlenkova N. I. 2016, Petrofizicheskiye problemy global'noy tektoniki [Petrophysical problems of global tectonics]. Tectonophysics and topical issues of Earth sciences. The 4th tectonophysical conference at the Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences (IPE RAS) with international participation, pp. 529-537.

^{* ⊠} ivanovks@igg.uran.ru



- 19. Porfiryev V. B. 1987, Priroda nefti, gaza i iskopayemykh ugley [The origin of oil, gas and fossil coal]. Selectas. Vol. 2. Abiogennaya neft' [Abiogenic oil]. Kiev, 216 p.
- 20. Sokol A. G., Tomilenko A. A., Bulbak, T. A., Sobolev N. V. 2017, Synthesis of hydrocarbons in the conversion of CO₂ fluid by hydrogen: experimental simulation at 7.8 hPa and 1350° C. *Doklady Akademii nauk* [Doklady Earth Sciences], vol. 477, no. 6. pp. 699–703. (In Russ.) URL: https:// elibrary.ru/item.asp?id=30752880
- 21. Timurziev A. I. 2014. Regularities of extensive and stratigraphical distribution of oil and gas deposits of the West-Siberian oil-bearing field on the basis of ideas about their deep genesis, young age and the latest formation time. Gornyye vedomosti [Mining news], no. 5 (120), pp. 24–46. (In Russ.) URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=21577221
- 22. Fedorov Yu. N., Ivanov K. S., Erokhin Yu. V., Ronkin Yu. L. 2007, Inorganic geochemistry of oil in Western Siberia (the first results of the study by ICP-MS method). Doklady Akademii nauk [Doklady Earth Sciences], vol. 414, no. 3. pp. 385-388. (In Russ.) URL: https://elibrary.ru/item. asp?id=9533485
- 23. Chekaliuk E. B., Kenney J. F. 1991, The stability of hydrocarbons in the thermodynamic conditions of the Earth. Proceedings of the American Physical Society, vol. 36(3). 347 p.
 24. Cruse A. M., Seewald J. S. 2006, Geochemistry of low-molecular weight hydrocarbons in hydrothermal fluids from Middle Valley, Northern
- Juan de Fuca Ridge. Geochimica et Cosmochimica Acta, vol. 70, issue 8, pp. 2073–2092. https://doi.org/10.1016/j.gca.2006.01.015 25. 2002, Gulf of Mexico Waits For A Turnaround, World Oil. March. URL: https://www.worldoil.com/magazine/2002/march-2002/features/gulf-of-
- mexico-waits-for-a-turnaround
- 26. Howard G. H., Barry P. H., Pernet-Fisher J. F., Baziotis I. P., Pokhilenko N. P., Pokhilenko L. N., Bodnar R. J., Taylor L. A., Agishev A. M. 2014, Superplume metasomatism: evidence from Siberian mantle xenoliths. Lithos, vol. 184–187, pp. 209–224. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2013.09.006 27. Ivanov S. N., Ivanov K. S. 1993, Hydrodynamic Zoning of the Earth's crust and its Significance. Journal of Geodynamics. Vol. 17, issue 4. P. 155-180. https://doi.org/10.1016/0264-3707(93)90006-R
- 28. Kaminsky F. V., Wirth R., Schreiber A. 2014, Carbonatitic inclusions in deep mantle diamond from Juina, Brazil: new minerals in the carbonate-halide association. The Canadian Mineralogist, vol. 51, issue 5, pp. 669-688. https://doi.org/10.3749/canmin.51.5.669
- 29. Kitchka A. 2004, Juvenile petroleum pathway: from fluid inclusions via tectonics and outgassing to its commercial fields. Ukrainian Geologist, no. 2 (6), pp. 37-47.
- 30. Kolesnikov A., Kutcherov V., Goncharov A. 2009, Methane-derived hydrocarbons produced under upper-mantle conditions. Nature Geoscience, vol. 2, pp. 566-570. https://doi.org/10.1038/ngeo591
- 31. Mukhina E. D., Kolesnikov A. Yu., Serovaisky A. Yu., Kucherov V. G. 2017, Experimental Modelling Of Hydrocarbon Migration Processes. *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 950. 042040. URL: http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/950/4/042040/pdf
- 32. 2009, Operators report string of Gulf of Mexico discoveries. Oil & Gas Journal, vol. 107, issue 7, p. 35.
- 33. Proskurowski G., Lilley M. D., Seewald J. S., Fruh-Green G. L., Olson E. J., Lupton J. E., Sylva S. P., Kelley D. S. 2008, Abiogenic hydrocarbon at Lost City hydrothermal field. *Science*, vol. 319, issue 5863, pp. 604–607. https://doi.org/10.1126/science.1151194

 34. Shirey S. B., Cartigny P., Frost D. J., Keshav S., Nestola F., Nimis P., Pearson D. G., Sobolev N. V., Walter M. J. 2013, Diamonds and the
- geology of mantle carbon. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, vol. 75, issue 1, pp. 355–421. https://doi.org/10.2138/rmg.2013.75.12 35. Sverjensky D. A., Stagno V., Fang Huang. 2014, Important role for organic carbon in subduction-zone fluids in the deep carbon cycle. *Nature*
- Geoscience, vol. 7, pp. 909-913. https://doi.org/10.1038/ngeo2291
- 36. Weiss Y., Kiflawi I., Davies N., Navon O. 2014, High-density fluids and the growth of monocrystalline diamonds. Geochimica et Cosmochimica Acta, vol. 141. 15 September, pp. 145–159. https://doi.org/10.1016/j.gca.2014.05.050

The article was received on July 17, 2018

УДК 535.651:535.243

Количественная оценка цвета ювелирных камней с аллохроматической окраской

Роман Николаевич ЗУБОВ*

Уфимский государственный нефтяной технический университет, Россия, Республика Башкортостан, Уфа

Актуальность работы обусловлена необходимостью разработки цифровых технологий определения цветовых характеристик ювелирных камней для повышения точности их оценки.

Цель работы: разработка метода, который позволит определять количественные показатели некоторых цветовых характеристик ювелирных камней. **Методология исследования:** изучение спектров поглошения ювелирных камней, выявление закономерностей и разработка математического аппарата для количественной оценки показателя светлоты.

Результаты. Установлена зависимость светлоты ювелирного камня от относительной величины поглошения света в зоне полосы поглошения, обусловленной главным элементом-хромофором. Математически определена характеристика, пропорциональная оптической плотности ювелирного камня, которая может использоваться для количественной оценки его светлоты. Показана нелинейность шкалы данной характеристики в сравнении с принятыми в России и США группами цвета или показателями светлоты. Приведены примеры, раскрывающие подходы к количественной оценке цвета различных ювелирных камней с аллохроматической окраской.

Заключение. Измерение спектральных характеристик ювелирных камней позволяет проводить количественную оценку показателей их светлоты. Для практического применения данной методики необходимо определение эталонов цвета и последующая градуировка шкалы. Точность проводимых измерений зависит от нескольких факторов, главным из которых является размер образца. Для повышения точности определения светлоты крупных ювелирных камней необходимо увеличивать количество измерений.

Ключевые слова: геммология, ювелирные камни, спектрометр, спектр поглошения, абсорбция света, цветовой тон, светлота, хромофор.

Всесторонняя характеристика многообразия цветных камней и их связь с присутствием элементов-хромофоров приведена в энциклопедии В. В. Буканова [1], а также работах зарубежных авторов [2, 3]. Связь спектров поглощения с цветовыми характеристиками и элементами-хромофорами также изучалась достаточно детально [4]. Показано, что области с наименьшим поглощением длин волн соответствующих цветов и определяют видимый цвет камня. Достаточно много работ посвящено анализу влияния различных хромофоров на цвета турмалинов, в том числе ионов Mn²+, Mn³+ [5, 6], а также Cu²+ и Fe²+ [7].

Для определения цвета камня на протяжении XX в. предлагались различные подходы и модели, которые в итоге трансформировались в международный стандарт CIELAB, отличающийся сложным математическим аппаратом и тем не менее использующийся для практических целей [8], а также трехмерная модель и плоский цветной круг системы GIA (Colored stones. Issue 8. Gemological Institute of America. Reprinted 2004. 48 p. URL: https://www4.gia.edu/tryelearning/220-08/media/resources/cs08_printable.pdf) с 31 цветным элементом. Система GIA также предполагает разделение камней по одиннадцати (0–10) группам светлоты и шести (1–6) группам насыщенности (The Gemology Project. URL: www.gemologyproject.com/wiki/index.php?title=Color_grading). В России приняты по 5 групп цвета для изумрудов, рубинов, сапфиров и отсутствуют нормативные документы для других цветных камней. Хотя аналогичные предложения, например, по оценке цвета турмалинов вырабатываются ([9]).

Несмотря на существование большого числа систем оценки цвета камня, при практической оценке приходится решать не только задачу соответствия камня какой-либо группе цвета, но и определять степень «близости» этого цвета к границам той или иной группы. Для камней большой стоимости это имеет существенное значение и часто вызывает споры среди специалистов, так как оценка цвета во многом субъективна и зависит от опыта и индивидуального цветового восприятия оценщика.

Пока геммологи всех стран признают три основных прибора – микроскоп, рефрактометр и спектроскоп в совокупности с множеством дополняющих их приспособлений. Поэтому логично использовать один из них, а именно спектрометр (правда, цифровой) для количественной оценки цвета. Анализируя спектры поглощения с целью идентификации самых разных камней, удалось установить, что перепад между минимумом и максимумом в зоне, характерной для атомов хромофора, пропорционален светлоте окраски камня.

Методы исследования

Спектрометр GL Gem Spectrometer Канадского института геммологии (https://www.cigem.ca) позволяет получать спектры пропускания и спектры поглощения света, прошедшего сквозь камень. Источником света служит галогенная лампа. Дальше мы увидим, что именно спектры поглощения удобны для цифровой обработки цвета, хотя камни во всех системах оценки оцениваются по пропусканию цвета. Например, такая оценка предлагается Е. А. Васильевым для бриллиантов [10]. В Голландии аналогичные работы также ведутся для бриллиантов, высокая стоимость которых делает «машинные» методы особенно востребованными [11]. Попытки анализа спектров поглощения, в том числе турмалинов, с целью оценки цвета были выполнены коллективом авторов, они очень сложны [12].

Атомы элемента-хромофора, встроенные в ту или иную кристаллическую решетку при образовании кристалла или при воздействии на него [13] обеспечивают поглощение света определенных длин волн, оставшиеся (непоглощенные)

длины волн и обеспечивают видимую глазом окраску камня той или иной интенсивности. Упрощенно можно сказать, что атомы хрома в решетке корунда обеспечивают красную окраску рубина, в решетке берилла – зеленую окраску изумруда, в решетке крокоита – оранжевую окраску и т. д. Очевидно, что чем больше будет поглощаться света, тем темнее будет выглядеть оставшийся цвет (об этом свидетельствует пик-максимум полосы поглощения хромофора на спектре поглощения). Логично определить его относительную величину по сравнению с зоной максимального пропускания света (минимум на спектре поглощения в зоне длин волн, определяющих окраску камня или его цветовой тон (tone)). Как правило, эта зона располагается справа или слева от пика-максимума поглощения.

Расчетные уравнения

Используем известный в оптике закон Бугера:

$$I = I_0 \exp(-\alpha t)$$
,

где I – интенсивность света, прошедшего слой вещества толщиной t; $I_{\scriptscriptstyle 0}$ – интенсивность света при входе в вещество; α – показатель поглощения.

Светопропускание (light transmittance)

$$T = I/I_0 = \exp(-\alpha t)$$
.

Абсорбция света (light absorption)

$$A = -\log T = \alpha t \log e$$

согласно описанию спектрометра.

Цветовой тон камня соответствует диапазону длин волн с минимальным поглощением λ_{\min} (hue). Главный хромофор формирует зону поглощения длин волн других цветов с максимумом при λ_{\max} . Чем больше максимум, тем темнее кажется камень для человеческого глаза. Поскольку количественно поглощение света различных длин волн зависит от многих факторов, надо изучать относительную высоту максимума:

$$\begin{split} A_{\max} - A_{\min} &= -\log \, T_{\lambda \max} + \log \, T_{\lambda \min} = \log \, \exp \, (-\alpha_{(\lambda \min)} \, t) - \log \, \exp \, (-\alpha_{(\lambda \max)} \, t) = \\ &= \alpha_{\lambda \max} \, t \log \, e - \alpha_{\lambda \min} \, t \log \, e = (\alpha_{\lambda \max} - \alpha_{\lambda \min}) t \log \, e = \Delta \alpha t \log \, e, \end{split}$$

где $\Delta \alpha = \alpha_{\lambda max} - \alpha_{\lambda min}$.

Величина $\Delta \alpha t$ позволяет оценить степень светлоты (tone) камня. Человеческий глаз не может «разделить» $\Delta \alpha t$ на оптическую плотность и толщину точно так же, как мы не можем видеть плотность камня, а видим только его объем. Теперь перейдем к шкале оценки тона камня, например, от 5 до 1, которая обычно представляется в виде:

$\alpha_{\lambda min} = \alpha_{\lambda max}$	555555	55 44	444444	33333333	2222222	11111111	$\alpha_{\lambda min} = \alpha_{\lambda max}$
T =	1,0	0,8	0,	,6 0),4	0,2	0

На самом деле тон цвета изменяется непрерывно, без скачков на границах, но протяженность участков тона не является линейной функцией, покажем это:

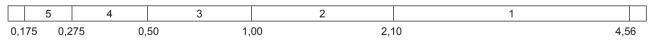
$$T_{i+1} = I_{i+1}/I_0 = \exp(-\alpha(i+1)t); T_i = I_i/I_0 = \exp(-\alpha(i)t);$$

тогда отношение
$$T_{i+1}/T_i = \exp(-\alpha(i+1)t + \alpha(i)t) = \exp k$$
,

где k – некоторая постоянная для конкретного камня.

Результаты исследований и их обсуждение

Так, по итогам экспериментов возможно использование k = 0.8 и exp $0.8 \approx 2.22$ для оценки тона зеленого берилла и следующей шкалы:



Замеры $\Delta \alpha t$ для различных камней показали, что при повороте камня на столике прибора наблюдается разброс показаний, иногда значительный. Разброс наблюдался у изотропных и анизотропных камней, очень чистых и с включениями, окрашенных одним и двумя хромофорами, так что связать его со свойствами камня пока не удалось. Но для разных камней (турмалинов, гранатов, шпинелей и т. д.) разброс показаний $\Delta \alpha t$ всегда возрастал с размером камня. Поэтому для камней размером до 1 карата достаточно снять одно показание, а для больших – от 3 до 6 показаний, чтобы повысить точность измерений.

Для иллюстрации изложенного принципа измерения светлоты рассмотрим линию из семи турмалинов массой от 6 до 16 карат розового и красного цвета, окраска которых обусловлена в основном наличием Mn²⁺, расположив их от

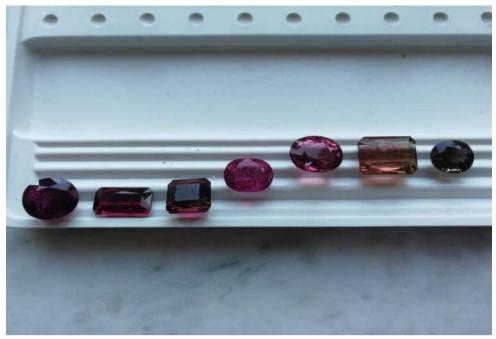


Рисунок 1. Фото турмалинов со стороны граней короны. Figure 1. Photos of tourmalines from the sides of a crown.



Рисунок 2. Фото турмалинов со стороны граней павильона. Figure 2. Photos of tourmalines from the sides of the pavilion.

темного к светлому – фото со стороны граней короны (рис. 1) и фото со стороны граней павильона (рис. 2). Показатель насыщенности цвета здесь не принимается в расчет, хотя отчетливо видно, как турмалины отличаются и по этому показателю.

Измерения с помощью спектрометра GL Gem Spectrometer дают следующие средние показатели светлоты для этих семи камней:

Для того чтобы проиллюстрировать разброс показаний спектрометра при вращении камня, приведены спектры поглощения для красного медьсодержащего турмалина из Мозамбика массой 12,3 карат (№ 1 из линейки) и розового турмалина из Мозамбика массой 11,3 карат (№ 5 из линейки). Произведены статистическая обработка результатов измерений и определение среднего значения A, среднего квадратического отклонения $S = \sqrt{\sum (A_i - A)^2/n}$ и коэффициента вариации V = S/A. Для указанных образцов эти значения составили:

– турмалин № 1 – A = 2,19; S = 0,222; V = 10 % (рис. 3);

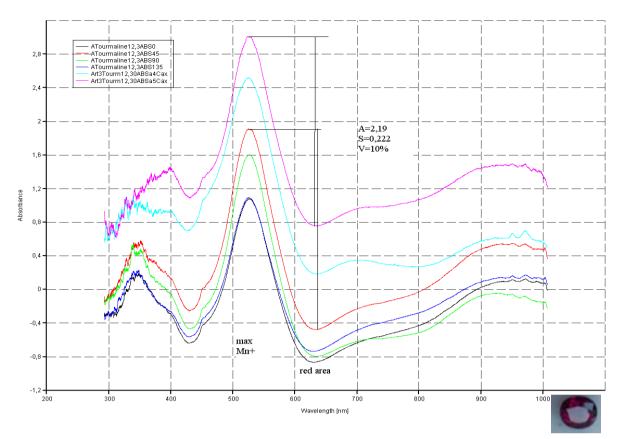


Рисунок 3. Спектры поглощения турмалина № 1 при вращении камня на столике прибора. Figure 3. The absorption spectra of tourmaline No. 1 while the rotation of a stone on the platen.

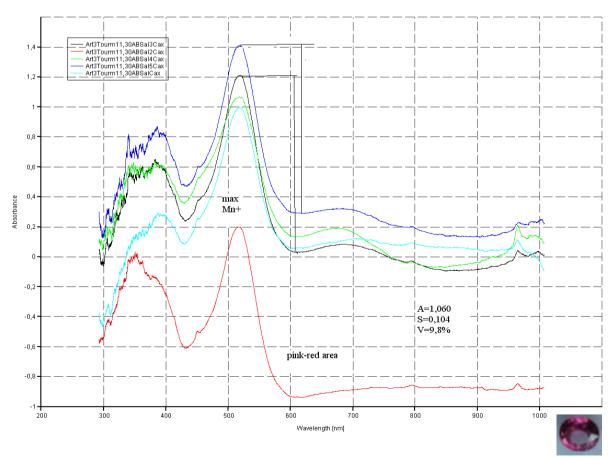


Рисунок 4. Спектры поглощения турмалина № 5 при вращении камня на столике прибора. Figure 4. The absorption spectra of tourmaline No. 5 while the rotation of a stone on the platen.

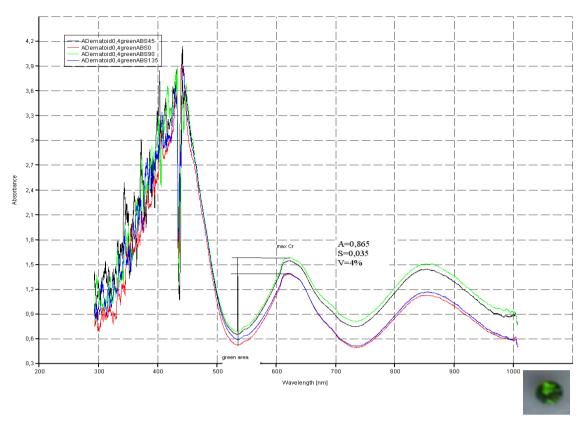


Рисунок 5. Спектры поглощения уральского демантоида при вращении камня на столике прибора. Figure 5. The absorption spectra of the Ural demantoid while the rotation of a stone on the platen.

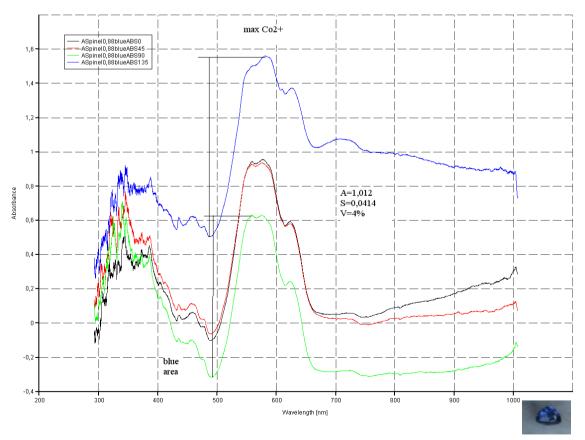


Рисунок 6. Спектры поглощения кобальтовой шпинели при вращении камня на столике прибора. Figure 6. The absorption spectra of cobalt spinel while the rotation of a stone on the platen.

- турмалин № 5 - A = 1,06; S = 0,104; V = 9,8 % (рис. 4).

Для сравнения далее приведены спектры поглощения уральского зеленого демантоида (2 цвет) массой 0,4 карата, окрашенного хромом Cr^{3+} [14] (рис. 5) и голубой кобальтовой шпинели из Шри-Ланки массой 0,88 карат, окрашенной кобальтом Co^{2+} [15] (рис. 6), в качестве примеров изотропных камней с соответствующей статистической обработкой:

- демантоид A = 0.865; S = 0.035; V = 4 % (рис. 5);
- шпинель A = 1,012; S = 0,041; V = 4 % (рис. 6).

Коэффициент вариации заметно возрастает с увеличением размера камня и, возможно, с увеличением количества хромофоров, которые, обогащая окраску камня, повышают изменчивость показателя светлоты при поворотах на столике прибора.

Выводы

Таким образом, измерение спектральных характеристик цветных камней позволяет проводить количественную оценку показателей их светлоты. Для практического применения данной методики необходимы определение эталонов цвета ювелирного камня [16], физических характеристик освещения и последующая градуировка шкалы. Точность проводимых измерений зависит от нескольких факторов, главным из которых является размер образца, поэтому для повышения точности определения светлоты крупных камней необходимо увеличить количество измерений.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Буканов В. В. Цветные камни. Энциклопедия. СПб.: Otava book Printing Ltd, 2008. 416 c. http://gems.minsoc.ru
- 2. Nassau K. Color for science, Art and Technology. Vol. 1. Amsterdam: Elsevier, 1997. 490 p. https://www.elsevier.com/books/color-for-science-art-and-technology/nassau/978-0-444-89846-3
- 3. Darby Dyar M. Color in minerals. USA: West Chester University, 348 p. URL: http://www.minsocam.org/msa/monographs/Mngrph_03/MG003_323-348.pdf
- 4. Tani S., Fukunaga Y., Shimizu S., Fukunishi M., Ishil K., Tamiya K. Color standardization method and system for whole slide imaging based on spectral sensing // Analytical Cellular Pathology. 2012. Vol. 35, issue 2. P. 107–115. http://dx.doi.org/10.3233/ACP-2011-0037
- 5. Bacik P., Fridrichova J., Stubna J., Antal P. Application of spectroscopic methods in mineralogical and gemmological research of gem tourmalines // Acta Geologica Slovaca. 2015. Vol. 7(1). P. 1–9. URL: http://geopaleo.fns.uniba.sk/ageos/archive/2015_01/bacik_et_al_2015.pdf
- 6. Reddy J., Frost R., Martens W., Wain D., Kloprogge T. Spectroscopic characterization of Mn-rich tourmalines // Vibrational Spectroscopy. 2007. Vol. 44. P. 42–49. https://doi.org/10.1016/j.vibspec.2006.07.010
- 7. Merkel P., Breeding C. Spectral differentiation between copper and iron colorants in gem tourmalines // Gems and gemology. 2009. Summer. Vol. 45. P. 112–119. URL: https://www.stellarnet.us/wp-content/uploads/G-and-G-Article.pdf
- 8. Xueyang L., Ying G. Color grading of emerald green based CIE 1976 L*a*b / 2nd International Conference on Economics, Social Science, Arts, Education and Management Engineering (ESSAEME 2016). Beijing: China University of Geosciences, 2016. P. 818–826. URL: https://download.atlantis-press.com/article/25860334.pdf
- 9. Коновалова А. Н. Анализ цвета турмалинов для дизайна ювелирных изделий: дис. ... канд. техн. наук. Иркутск, 2011. 155 с.
- 10. Васильев E. A. Регистрация спектров поглощения ограненных драгоценных камней // Записки Горного института. 2013. Т. 200. C. 163–166. URL: http://pmi.spmi.ru/index.php/pmi/article/download/732/760
- 11. Royen J., Loots I. Automatic color grading. WTOCD, Lier, Belgium. URL: http://www.wtocd.be/nl/Projects/lumisense auto color.html
- 12. Ertl A., Kolitsch U., Dyar M., Hughes J., Rossman G., Pieczka A., Henry D., Pezzotta F., Prowatke S., Lenganer C., Korner W., Brandstatter F., Francis C., Prem M., Tillmanns E. Limitations of Fe²⁺ and Mn²⁺ site occupancy in tourmaline: Evidence from Fe²⁺ and Mn²⁺ rich tourmaline // American Mineralogist. 2012. Vol. 97 (8–9). P. 1402–1416. https://doi.org/10.2138/am.2012.4028
- 13. Лопатин О. Н., Николаев А. Г., Хайбуллин Р. Н. Кристаллохимические аспекты ионной имплантации минералов и их синтетических аналогов // Записки РМО. 2012. Т. 141. № 1. С. 61–70. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=17674662
- 14. Кропанцев С. Ю. Хромовый андрадит из Ново-Каркодинского месторождения демантоида // Изв. УГГУ. 2000. Вып. 10. С. 72–78. http://iuqqu.ru/download/10zip.pdf
- 15. Kleismantas A., Dauksyte A. The influence of Vietnam and Sri-Lanka spinel mineral chemical elements on colour // Chemija. 2016. Vol. 27. № 1. P. 45–51. URL: http://mokslozurnalai.lmaleidykla.lt/publ/0235-7216/2016/1/45%E2%80%9351.pdf
- 16. Киселев Р. К. Необходимость обновления системы оценки цвета ограненного камня // Научный вестник Московского государственного горного университета. 2012. № 9. С. 30–37. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=17964606

Статья поступила в редакцию 31 августа 2018 г.

УДК 535.651:535.243 https://doi.org/10.21440/2307-2091-2018-4-50-56

Quantitative evaluation of the colour of gem stones with allochromatic colour

Roman Nikolaevich ZUBOV

Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia

The relevance of the work: is due to the need to develop digital technologies for determining the colour characteristics of gem stones to improve the accuracy of their evaluation.

The purpose of the work: development of a method that will allow us to determine the quantitative indicators of some colour characteristics of gem stones.

Methodology of the research: the study of the absorption spectra of gem stones, the identification of patterns and the development of mathematical tools for quantitative estimate the lightness parameter.

Results. The dependence of the lightness of a gemstone is established by the relative magnitude of light absorption in the zone of the absorption band caused by the main element-chromophore. Mathematically, the characteristic proportional to the optical density of the gemstone is determined, which can be used to quantify its lightness. The nonlinearity of the scale of this characteristic is shown in comparison with the colour groups or lightness indicators accepted in Russia and the USA. Examples are given that reveal the approaches to quantifying the colour of various gem stones with allochromatic colour.

Conclusion. Measurement of the spectral characteristics of gem stones allows us to quantify the indicators of their lightness. For the practical application of this technique, it is necessary to determine the colour standards and the subsequent graduation of the scale. The accuracy of measurements depends on several factors; the main being the sample size. To improve the accuracy of determining the lightness of large gem stones, it is necessary to increase the number of measurements.

Keywords: gemology, gem stones, spectrometer, absorption spectrum, light absorption, colour hue, lightness, chromophore.

REFERENCES

- 1. Bukanov V. V. 2008, Gemstones. Encyclopedia. Saint-Petersburg, 416 p. http://gems.minsoc.ru
- 2. Nassau K. 1997, Color for science, Art and Technology. Vol. 1. Amsterdam: Elsevier, 490 p. https://www.elsevier.com/books/color-for-science-art-and-technology/nassau/978-0-444-89846-3
- 3. Darby Dyar M. Color in minerals. USA: West Chester University, 348 p. URL: http://www.minsocam.org/msa/monographs/Mngrph_03/MG003 323-348.pdf
- 4. Tani S., Fukunaga Y., Shimizu S., Fukunishi M., Ishil K., Tamiya K. 2012, Color standardization method and system for whole slide imaging based on spectral sensing. *Analytical Cellular Pathology*, vol. 35, issue 2, pp. 107–115, http://dx.doi.org/10.3233/ACP-2011-0037
- 5. Bacik P., Fridrichova J., Stubna J., Antal P. 2015, Application of spectroscopic methods in mineralogical and gemmological research of gem tourmalines. *Acta Geologica Slovaca*, vol. 7(1), pp. 1–9. URL: http://geopaleo.fns.uniba.sk/ageos/archive/2015 01/bacik et al 2015.pdf
- 6. Reddy J., Frost R., Martens W., Wain D., Kloprogge T. 2007, Spectroscopic characterization of Mn-rich tourmalines. *Vibrational Spectroscopy*, vol. 44, pp. 42–49. https://doi.org/10.1016/j.vibspec.2006.07.010
- 7. Merkel P., Breeding C. 2009, Spectral differentiation between copper and iron colorants in gem tourmalines. *Gems and gemology*, vol. 45, Summer, pp. 112–119. URL: https://www.stellarnet.us/wp-content/uploads/G-and-G-Article.pdf
- 8. Xueyang L., Ying G. 2016, Color grading of emerald green based CIE 1976 L*a*b. 2nd International Conference on Economics, Social Science, Arts, Education and Management Engineering (ESSAEME 2016). Beijing: China University of Geosciences, pp. 818–826. URL: https://download.atlantis-press.com/article/25860334.pdf
- 9. Konovalova A. N. 2011, *Analiz tsveta turmalinov dlya dizayna yuvelirnykh izdeliy* [Color analysis of tourmaline for jewelry design]. PhD thesis. Irkutsk, 155 p.
- 10. Vasilyev E. A. 2013, Registration of the faceted gems absorption spectra. Journal of Mining Institute, vol. 200, pp. 163–166. URL: http://pmi.spmi.ru/index.php/pmi/article/download/732/760
- 11. Royen J., Loots I. Automatic color grading. WTOCD, Lier, Belgium. URL: http://www.wtocd.be/nl/Projects/lumisense auto color.html
- 12. Ertl A., Kolitsch U., Dyar M., Hughes J., Rossman G., Pieczka A., Henry D., Pezzotta F., Prowatke S., Lenganer C., Korner W., Brandstatter F., Francis C., Prem M., Tillmanns E. 2012, Limitations of Fe²⁺ and Mn²⁺ site occupancy in tourmaline: Evidence from Fe²⁺ and Mn²⁺ rich tourmaline. *American Mineralogist*, vol. 97 (8–9), pp. 1402–1416. https://doi.org/10.2138/am.2012.4028
- 13. Lopatin O. N., Nikolaev A. G., Khaibullin R. I. 2012, Crystal-chemical aspects of the ionic implantation of minerals and their synthetic analogs. *Zapiski RMO* [Proceedings of the Russian Mineralogical Society], Part 141, issue 1, pp. 61–70. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=17674662
- 14. Kropantsev S. Yu. 2000, Chromium andradite from the Novo-Karkodinskoe deposit of demantoid garnets. *Izvestiya UGGU* [News of the Ural State Mining University], issue 10, pp. 72–77. (*In Russ.*) https://iuggu.ru/download/10zip.pdf
- 15. Kleismantas A., Dauksyte A. 2016, The influence of Vietnam and Sri-Lanka spinel mineral chemical elements on colour. *Chemija*, vol. 27, no. 1, pp. 45–51. URL: http://mokslozurnalai.lmaleidykla.lt/publ/0235-7216/2016/1/45%E2%80%9351.pdf
- 16. Kiselev R. K. 2012, The need to update the evaluation system color cut stone. *Nauchnyy vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta / Gornye nauki i tehnologii* [Mining Science and Technology], no. 9, pp. 30–37. (*In Russ.*) URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=17964606

The article was received on August 31, 2018



https://orcid.org/0000-0002-2746-6041

УДК 622.276.1

Методологические основы оценки фильтрационно-емкостных свойств продуктивного горизонта при эксплуатации его горизонтальными скважинами

Самира Вагиф АББАСОВА*

Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности, Азербайджан, Баку

Актуальность работы. В статье проведен обзор информации о строении и свойствах нефтяных пластов, об условиях сосредоточения и фильтрации в них нефти. Применение горизонтальных скважин с учетом фильтрационно-емкостных характеристик пласта позволяет значительно увеличить площадь контакта с нефтенасышенным пластом, обеспечить максимальный охват выработкой и тем самым сократить время разработки и снизить затраты на добычу нефти.

Шель работы. Рассмотрены основные концепции разработки коллектора и их прикладное применение к горизонтальным скважинам в сравнении с вертикальными скважинами.

Методы исследования. Дан сравнительный анализ показателя фильтрационно-емкостных свойств продуктивного горизонта при эксплуатации его горизонтальными и вертикальными скважинами.

Результаты. Проведен анализ влияния скин-зоны на фильтрационно-емкостные характеристики пласта. На конкретном примере были подсчитаны потери давлений для горизонтальных и вертикальных скважин с целью проведения сравнительного анализа рассматриваемых скважин. Показано, что при одном и том же значении положительного скин-фактора потери давления в скин-зоне горизонтальной скважины всегда меньше его значения в вертикальной. Горизонтальные скважины могут выдержать большую степень повреждения, чем вертикальные, без значительной потери дебита.

Проведенный анализ показывает, что нарушение в окрестности призабойной зоны скважины вследствие закупоривания порового пространства коллектора приводит к образованию зоны с пониженной проницаемостью и дополнительных потерь давления – скин-зоны. Поэтому предварительно перед принятием решения о воздействии на призабойную зону горизонтальной скважины необходимо оценить величину падения давления в скин-зоне и сравнить ее с общим перепадом давления между пластом и забоем, проницаемость скин-зоны с проницаемостью пласта. Выводы. Аля своевременного воздействия на призабойную зону скважины с целью улучшения проницаемости этой зоны и повышения продуктивности скважины необходимо оценить величину падения давления в скин-зоне.

Ключевые слова: коллектор, скважины, дебит, перепад давления, проницаемость, скин-фактор, скин-зона, фильтрационно-емкостные свойства.

целью эффективного управления процессом извлечения нефти из пластов и для решения проблемы улучшения фильтрационных свойств флюидов, увеличения нефтеотдачи пластов для начала необходимо обладать информацией о строении и свойствах нефтяных коллекторов, об условиях сосредоточения и фильтрации в них нефти. Известно, что степень насыщенности нефтью глубокозалегающих плотных, пористых, слабосцементированных пород, в основном представленных песчаниками, известняками или доломитами, неравномерна. Вследствие беспорядочного расчленения нефтегазоносных пластов непроницаемыми линзами, пропластками и слоями различной мощности наблюдается бессистемное изменение физических и фильтрационно-емкостных свойств.

Обычно нефтегазоносные отложения характеризуются широким фракционным составом – породы чаще мелкозернистые, реже – среднезернистые, содержащие различное количество примесей.

Итак, нефтегазовый коллектор – горная порода, которая обладает свойствами, позволяющими накапливать газ, нефть, воду и фильтровать их при наличии перепада давления [1-4].

Основные критерии коллектора нефти и газа – его емкостная и фильтрационная характеристики, определяемые пористостью, проницаемостью, а в более общем виде – типом коллектора.

Различают следующие виды коллекторов нефти и газа: терригенные и карбонатные.

Состав терригенных пород представляет собой комплекс обломочных осадочных отложений, а также зерна с широким спектром размеров, которые имеют различный тип цементации. Обычно эти породы сложены в разной мере сцементированными песчаниками, алевролитами, а также в виде смеси их с глинами и аргиллитами и по минералогическому составу – кварцевые и полимиктовые.

Для терригенных пород-коллекторов фильтрационные свойства изменяются в достаточно широком диапазоне. Проницаемость их колеблется в пределах от 3–5 до 0,0001–0,001 мкм², а пористость – от 25–26 до 12–14 %.

Карбонатные породы состоят из известняков и доломитов, основное различие которых заключается в типе пустотного пространства и, как следствие – в емкостных характеристиках. Мелкозернистые, слабопроницаемые, мелкопористые карбонатные коллекторы, обладающие низкой полезной емкостью и плохими фильтрационными свойствами, такими как пористость 8–15 %, проницаемость 0,0001–0,001 мкм², являются сильно перекристализированными породами (матрицы). Емкостные свойства карбонатных коллекторов этого типа связаны с пористостью матриц, а фильтрационные свойства – с трещиноватостью пород.

Высокопористые, высокопроницаемые карбонатные коллекторы – хорошие объекты для разработки.

Рассмотрим основные концепции разработки коллектора и их прикладное применение к горизонтальным скважинам в сравнении с вертикальными скважинами.

Известно, что вокруг ствола скважины с измененной или уменьшенной проницаемостью (скин-зона) имеется зона дополнительных потерь давления, в результате чего при определенной скорости потока замеренное пластовое давление оказывается меньше, чем теоретически рассчитанное. Необходимым условием при бурении скважины является

ИЗВЕСТИЯ УРАЛЬСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ГОРНОГО УНИВЕРСИТЕТА

положительное давление в стволе скважины, служащее для предотвращения притока пластовых флюидов в скважину. Проникновение же незначительного количества бурового раствора в коллектор приводит к ухудшению фильтрационно-емкостных свойств пласта и, как следствие, к образованию в стволе скважины зоны с пониженной проницаемостью.

Ван Эвердиген и Херст назвали это зоной проникновения фильтрата, или поврежденной зоной, скин-зоной и связанное с этой зоной снижение давления скин-эффектом [5–10].

Как известно, породы с высокой проницаемостью имеют более протяженную зону проникновения бурового раствора, но при этом снижение проницаемости в этих породах незначительно и положительные значения скин-фактора при этом также незначительны. Напротив, в породах с низкой проницаемостью толщина зоны вторжения незначительна, но при этом снижение проницаемости в этой зоне значительно, что приводит к высокому положительному значению скин-фактора после бурения. По всей вероятности, это связано с тем, что высокопроницаемые породы имеют большие размеры поровых каналов, которые не полностью блокируются. А вот низкопроницаемые породы с маленькими размерами пор полностью блокируются твердой фазой.

Таким образом, повреждение в зонах с высокой проницаемостью относительно меньше, чем в зонах с низкой проницаемостью.

Нарушение проницаемости призабойной зоны скважины оказывает сильное влияние на величину понижения забойного динамического давления, соответствующего заданному дебиту скважины, а следовательно, на величину коэффициента продуктивности скважины.

Как правило, скин-факторы оцениваются с помощью опробования скважины испытателем пластов или методом восстановления давления. Зная скин-фактор, можно рассчитать потери давления вдоль поврежденных зон.

Для вертикальной скважины потери давления ΔPs зависят от q/h, т. е. от дебита на единицу длины пласта:

$$\left(\Delta P s\right)_{\text{Bep}} = \frac{S \mu B q}{2k \pi h}.\tag{1}$$

Следовательно, для горизонтальной скважины потери давления (ΔPs) зависят от q/L, т. е. от дебита приходящегося на единицу длины горизонтального ствола.

$$\left(\Delta Ps\right)_{\text{rop}} = \frac{S\mu Bq}{2k\pi L},\tag{2}$$

где S – скин-фактор; μ – вязкость; B – объемный коэффициент; k – проницаемость; q –дебит скважины; h – мощность пласта; L – длина забоя горизонтальной скважины.

Важнейшим фактором считается то, что при одном и том же значении положительного скин-фактора потери давления в скин-зоне горизонтальной скважины всегда меньше его значения вертикальной. Связано это с тем, что величина дебита, приходящаяся на длину вскрытой толщины пласта для горизонтальной скважины, намного меньше, чем для вертикальной. Горизонтальные скважины могут выдержать большую степень повреждения, чем вертикальные, без значительной потери дебита [11–15].

Для интерпретации проведенного анализа в качестве примера были использованы данные по вертикальной скважине А 55 и горизонтальной скважине С 27 месторождения N. Опробирование данных скважин показало, что скин-фактор положительный и равен S = +1. По формулам (1) и (2) были подсчитаны падения давления в скин-зоне, т. е. поврежденной зоне, для каждой из рассматриваемых скважин.

В результате расчета величина падения давления для вертикальной скважины составила $(\Delta Ps)_{\text{вер}} = 3$ мПа, а для горизонтальной скважины $(\Delta Ps)_{\text{гор}} = 0.12$ мПа. Данный пример ясно показывает, что для определенного положительного скин-фактора падение давления через скин-зону значительно меньше для горизонтальной скважины, чем для вертикальной. Это дает возможность судить о том, что применение конкретного метода воздействия на призабойную зону пласта с целью улучшения проницаемости в случае горизонтальной скважины будет иметь меньшую эффективность с точки зрения повышения ее продуктивности, чем вертикальной скважины. Поэтому предварительно перед принятием решения о воздействии на призабойную зону горизонтальной скважины необходимо оценить величину падения давления в скин-зоне и сравнить ее с общим перепадом давления между пластом и забоем, проницаемость скин-зоны с проницаемостью пласта. Это сравнение может быть в дальнейшем использовано для определения необходимости своевременного воздействия на призабойную зону скважины (гидроразрыв пласта, кислотная обработка забоя, перфорация и т. д.) с целью улучшения проницаемости этой зоны и повышения продуктивности скважины.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Зубов В. П. Применяемые технологии и актуальные проблемы ресурсосбережения при подземной разработке пластовых месторождений полезных ископаемых // Горный журнал. 2018. № 6. С. 77–83. https://doi.org/10.17580/gzh.2018.06.16
- 2. Закревский К. Е., Кундин А. С. Особенности геологического 3D моделирования карбонатных и трещиноватых резервуаров. М.: Белый ветер, 2016. 404 с.
- 3. Ермолкин В. И., Керимов В. Ю. Геология и геохимия нефти и газа. М.: Недра. 2012. 460 с.
- 4. Ли Дж., Ваттенбаргер Р. А. Инжиниринг газовых резервуаров. Ижевск: ИКИ, 2014. 944 с.
- 5. Латышев О. Г., Корнилков М. В. Исследование фрактальных характеристик трещинной структуры горных пород как критерия их прочности // Горный журнал. 2015. № 9. С. 17–21. https://doi.org/10.17580/gzh.2015.09.03
- 6. Joshi S. D. Horizontal Well Technology. Tulsa, Oklahoma, USA: Pennwell Publishing Company, 1991. 535 p. URL: https://oilworldtoday.files.wordpress.com/2017/05/horizontal-well-technology.pdf
- 7. Батлер Р. М. Горизонтальные скважины для добычи нефти, газа и битумов. Ижевск: ИКИ, 2010. 536 с.
- 8. Алиев З. С., Котлярова Е. М. Технология применения горизонтальных газовых скважин. М.: РГУ нефти и газа имени И. М. Губкина, 2015. 156 с.
- 58 Аббасова С. В. Методологические основы оценки фильтрационно-емкостных свойств продуктивного горизонта при эксплуатации его горизонтальными скважинами // Известия УГГУ. 2018. Вып. 4(52). С. 57-60. DOI 10.21440/2307-2091-2018-4-57-60

- 9. Яраханова Д. Г. Управление выработкой запасов нефти, дренируемых горизонтальными скважинами // Нефтяное хозяйство. 2015. № 4. С. 56–58.
- 10. Яраханова Д. Г. О целесообразности применения горизонтальных технологий нефтеизвлечения с учетом геолого-технологических условий // Нефтяное хозяйство. 2015. № 6. С. 68–71.
- 11. Chen Z., Liao X., Zhao X., Zhu L., Liu H. Performance of multiple fractured horizontal wells with consideration of pressure drop within wellbore // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2016. Vol. 146, October. P. 677–693. https://doi.org/10.1016/j.petrol.2016.07.009
- 12. Идиятуллина 3. С., Арзамасцев А. И., Музоваткина Е. Н. Повышение эффективности разработки низкопроницаемых коллекторов с применением гидроразрыва в скважинах с горизонтальным окончанием // Нефтяное хозяйство. 2014. № 1. С. 78–79.
- 13. Федоров В. Н., Гизатуллин Д. Р. Решение прямой и обратной задач гидродинамики при изменении фильтрационно-емкостных свойств нефтяного пласта в окрестности ствола скважины // Нефтяное хозяйство. 2014. № 8. С. 52–55.
- 14. Хасанов М. М., Мельчаева О. Ю., Рощектаев А. П., Ушмаев О. С. Стационарный дебит горизонтальных скважин в рядных системах разработки // Нефтяное хозяйство. 2015. № 1. С. 48–51.
- . 15. Чекушин В. Ф., Ганеев А. И., Лозин Е. В. Доразработка залежей крупного нефтяного месторождения с помощью горизонтальных скважин // Нефтяное хозяйство. 2015. № 10. С. 82–85.

Статья поступила в редакцию 30 марта 2018 г.

УДК 622.276.1

Methodological fundamentals of the evaluation of porosity and permeability properties of production horizon when using horizontal wells

Samira Vagif ABBASOVA*

abbasovasamira@mail.ru

Azerbaijan State University of Oil and Industry, Baku, Azerbaijan

The relevance of the work. This paper provides a review of information on the structure and properties of oil reservoirs, on the conditions of concentration and filtration of oil in them. The use of horizontal wells, taking into account porosity and permeability properties of the reservoir, can significantly increase the contact area with an oil-saturated reservoir, ensure maximum development coverage and thereby reduce development time reducing the cost of oil production.

Purpose of the work. The basic concepts of reservoir development and their application to horizontal wells in comparison with vertical wells are

Methods of research. A comparative analysis of the parameter of porosity and permeability properties of the production horizon, during the operation of its horizontal and vertical wells, is given.

Results. The analysis of the skin zone influence on porosity and permeability properties of the reservoir. For a specific example, pressure losses were calculated for horizontal and vertical wells in order to conduct a comparative analysis of the wells under consideration. It is shown that for the same value of the positive skin factor, the pressure loss in the skin zone of a horizontal well is always less than its value in the vertical one. Horizontal wells can withstand a greater degree of damage than the vertical, without significant loss of flow rate.

The analysis shows that a violation in the vicinity of the bottomhole zone, due to pore space bridging of the reservoir, leads to the formation of a zone with low permeability and additional pressure loss - the skin zone. Therefore, before making a decision on the impact on the bottomhole zone of a horizontal well, it is necessary to estimate the pressure drop in the skin zone and compare it with the total pressure drop between the reservoir and the bottom (the permeability of the skin zone with the reservoir permeability).

Conclusions. For timely impact on the well bottomhole to improve the permeability of this zone and increase the productivity of the well, it is necessary to estimate the pressure drop in the skin zone.

Keywords: reservoir, wells, flow rate, pressure drop, permeability, skin factor, skin zone, porosity and permeability properties.

- 1. Zubov V. P. 2018, Applied technologies and current problems of resource-saving in underground mining of stratified deposits. Gornyi Zhurnal [Mining journal], no. 6, pp. 77-83. (In Russ.) https://doi.org/10.17580/gzh.2018.06.16
- 2. Zakrevsky K. E., Kundin A. S. 2016, Osobennosti geologicheskogo 3D modelirovaniya karbonatnykh i treshchinovatykh rezervuarov [Features of geological 3D modeling of carbonate and fractured reservoirs]. Moscow, 404 p.
- 3. Ermolkin V. I., Kerimov V. Yu 2012, Geologiya i geokhimiya nefti i gaza [Geology and geochemistry of oil and gas]. Moscow, 460 p.
- 4. Lee J. R., Wattenbarge R. A. 2014, Inzhiniring gazovykh rezervuarov [Gas Reservoir Engineering]. Izhevsk, 944 p.
- 5. Latyshev O. G., Kornilkov M. V. 2015, Analysis of fractal characteristics of jointing in rocks as their strength criterion. Gornyi Zhurnal [Mining journal], no. 9, pp. 17-21. https://doi.org/10.17580/gzh.2015.09.03
- 6. Joshi S. D. 1991, Horizontal Well Technology. Tulsa, Oklahoma, USA: Pennwell Publishing Company, 535 p. URL: https://oilworldtoday.files. wordpress.com/2017/05/horizontal-well-technology.pdf
- 7. Butler R. M. 2010, Gorizontal'nyye skvazhiny dlya dobychi nefti, gaza i bitumov [Horizontal wells for oil, gas and bitumen production]. Izhevsk, 536 p. 8. Aliev Z. S., Kotlyarova E. M. 2015, Tekhnologiya primeneniya gorizontal'nykh gazovykh skvazhin [The technology of application of horizontal gas wells]. Moscow, 156 p.

 9. Yarakhanova D. G. 2015, Control of oil reserve recovery drained by horizontal wells. *Neftyanoye khozyaystvo* [Oil industry], no. 4, pp. 56–58.
- 10. Yarakhanova D. G. 2015, About rationale for application of horizontal technologies of oil recovery taking into account geological and technological conditions. Neftyanoye khozyaystvo [Oil industry], no. 6, pp. 68-71. (In Russ.)
- 11. Chen Z., Liao X., Zhao X., Zhu L., Liu H. 2016, Performance of multiple fractured horizontal wells with consideration of pressure drop within wellbore. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, vol. 146, October, pp. 677–693. https://doi.org/10.1016/j.petrol.2016.07.009 12. Idiyatullina Z. S., Arzamastsev A. I., Muzovatkina E. N. 2014, Improving the efficiency of the development of low-permeability reservoirs using
- hydraulic fracturing in horizontal sidetracked wells. Neftyanoye khozyaystvo [Oil industry], no. 1, pp. 78-79. (In Russ.)
- 13. Fedorov V. N., Gizatullin D. R. 2014, Solution of direct and inverse problems of hydrodynamics when changing porosity and permeability properties of the oil reservoir in the vicinity of the wellbore. Neftyanoye khozyaystvo [Oil industry], no. 8, pp. 52-55. (In Russ.)
- 14. Khasanov M. M., Melchaeva O. Yu., Roshchektaev A. P., Ushmaev O. S. 2015, Permanent-type capacity of horizontal wells in inline methods of working. Neftyanoye khozyaystvo [Oil industry], no. 1. pp. 48-51. (In Russ.)
- 15. Chekushin V. F., Ganeev A. I., Lozin E. V. 2015, Additional development of large oilfield deposits using horizontal wells. Neftyanove khozyaystvo [Oil industry], no. 10, pp. 82-85. (In Russ.)

The article was received on March 30, 2018



Использование метода георадиолокации для исследований древнего медного рудника «Воровская яма» на Южном Урале

Владислав Витальевич НОСКЕВИЧ, Наталья Васильевна ФЕДОРОВА

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

Актуальность. Неотьемлемой частью исследований в археологии стали геофизические методы, которые позволяют изучать погребенные памятники без разрушения почвенного слоя и дают возможность более целенаправленно определять место будущих дорогостоящих и трудоемких раскопок археологов. В степной зоне Южного Урала и Мугоджар известно около трех десятков древних медных рудников, разработка которых происходила в бронзовом веке. В настоящее время дно покрыто толстым слоем наносов, а борта карьеров оплыли. При исследовании древних рудников актуально определить рельеф карьеров и локализовать места добычи руды во время их эксплуатации, что позволяет провести оценки количества добытой руды и выплавленной меди.

Цель исследований. Выделение методом георадиолокации отражающих границ между рыхлыми отложениями наносов и скальными породами медного карьера бронзового века «Воровская Яма», построение объемной модели древнего карьера и определение места добычи руды.

Обоснование использования метода георадиолокации и методика исследований. Эффективность метода георадиолокации зависит от контраста диэлектрической проницаемости слоев в исследуемой среде. В данном случае это осадочный комплекс, представленный техногенными грунтами, и коренные породы, которые и определяют поверхность карьера во время его разработки. Коренные породы имеют значительный контраст диэлектрической проницаемости по сравнению с осадочным комплексом как минимум в два раза. Это обстоятельство позволяет выделить отражения от границы коренных пород. Съемка методом георадиолокации на карьере «Воровская Яма» проведена георадаром SIR-3000 по девяти параллельным профилям длиной 9–20 м с расстоянием между профилями 2 м. На профилях съемка проводилась с шагом между пикетами 0,1 м. Аля корректной интерпретации результатов и учета современного рельефа была проведена топографическая съемка. После обработки данных съемки на профилях построены георадарные разрезы.

Результаты исследований. После интерпретации на разрезах выделено два георадарных комплекса: нижний, который обусловлен кровлей коренных пород, и верхний, связанный с техногенными или переработанными грунтами. Отмечаются слабые отражающие границы в зоне верхнего комплекса, которые предположительно вызваны следами отвалов, погребенных канав и шурфов. Основными «индикаторами» при выделении границы между техногенным грунтом и коренными породами на георадарных разрезах является смена волновой картины отражений в этих средах, а также угловое несогласие осей синфазности отражений между ними. После интерполяции границ между профилями построена объемная модель рельефа рудника в период его разработки. Мошность наносов, образовавшихся к настоящему времени, варьирует в пределах карьера на кромке выработки от 0,5–1 м до 3 м в забое. Максимальная глубина карьера в древности была 7 м.

Выводы. По результатам георадарной съемки на руднике под толстым слоем более поздних наносов удалось уверенно определить рельеф коренных пород. Построена объемная модель древнего карьера, локализовано место добычи руды. Эти данные позволили оценить глубину и объем выработок в период разработки месторождения меди в бронзовом веке.

Ключевые слова: геофизические методы, георадар, георадиолокация, модель, медный рудник, бронзовый век, Южный Урал.

В последние десятилетия геофизические методы активно используются при изучении археологических памятников [1–3], в том числе и древних металлургических комплексов. В настоящее время в степной зоне Южного Урала и Мугоджар известно несколько десятков медных древних рудников разного типа, разработка которых происходила в эпоху бронзового века [4–9]. По предварительным расчетам на них было добыто приблизительно 55 тыс. т медной руды, в которой содержалось около 3,5 тыс. т металла [10]. За прошедшие века борта древних карьеров оплыли, и дно рудников и выработки с рудной минерализацией были засыпаны переработанными грунтами и осадочными породами [11]. Для исследований археологических памятников в последние годы, в том числе и для определения рельефа древних карьеров стали активно использовать геофизические методы, в частности метод георадиолокации [1, 12].

В георадиолокации основным физическим параметром для расчленения толщи грунтов и разделения неоднородных слоев является диэлектрическая проницаемость [13–14]. Для осадочных пород при естественной влажности значения диэлектрической проницаемости в метровом диапазоне электромагнитных волн колеблются от 12 до 30, а для кристаллических пород значения диэлектрической проницаемости составляют 3–6 [15]. Следовательно, между кристаллическими коренными отложениями и осадочным комплексом наблюдается значительный контраст свойств. Это позволяет предположить эффективность использования георадарной съемки и определения отражений от коренных пород, которые определяют поверхность карьера во время его эксплуатации.

В работе проведено геофизическое исследование медного карьера бронзового века «Воровская Яма». С помощью метода георадиолокации определены отражающие границы между рыхлыми отложениями, скопившимися за прошедшие века на дне карьера, и скальными породами. В результате удалось восстановить рельеф древнего карьер, определить места разработок и оценить объем добытой руды.

Описание рудника

Рудник расположен в степной зоне Южного Урала, в 5 км к северо-востоку от поселка Зингейский. Форма карьера округлая с диаметром 30–40 м и глубиной 3–4 м (рис. 1, А). Его окружает прерывистый вал высотой 0,8–1,5 м и шириной 5–15 м. Название рудника «Воровская Яма» связано с его использованием на равнинной открытой местности как

^{*} ☑ ubistu@gmail.com

https://orcid.org/0000-0002-0765-0183

**nataliavf50@mail.ru

https://orcid.org/0000-0002-0648-0768



Рисунок 1. Рудник «Воровская Яма». А – современный вид рудника; Б – разбивка георадарных профилей на дне карьера. Figure 1. "Vorovskaya Yama" ore district. A – up-to-date look of the ore district; Б – marking of ground-penetrating radar profiles at the bottom of the pit.

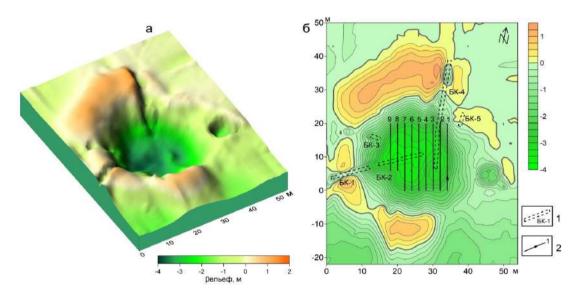


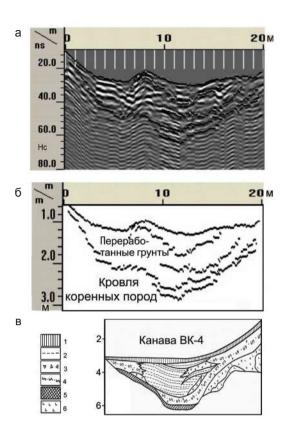
Рисунок 2. Современный рельеф рудника. а – рельеф рудника в 3D-формате; б – карта с изолиниями отметок рельефа. 1 – канавы и их обозначения согласно [9]; 2 – положение георадарных профилей и их номера, стрелка указывает направление съемки. Figure 2. Up-to-date relief of the ore district. а – relief of the ore district in 3D-format; б – map with structural contour of the relief. 1 – ditches and their keys according to [9]; 2 – position of ground-penetrating radar profiles and their numbers, the arrow indicates the survey direction.

места для укрытия ворованного скота. Вал и карьер покрыты степной растительностью и имеют достаточно мощный гумусный слой.

Первые исследования рудника проведены В. В. Зайковым, Г. Б. Здановичем и А. М. Юминовым в 1995 г. [16]. Непосредственно в карьере, а также по его бортам геологами было пройдено несколько канав и шурфов, отобраны пробы руд и пород на минералогические, петрографические и геохимические анализы. По результатам исследований составлены геологические разрезы [17]. В настоящее время канавы на дне карьера, пройденные геологами, затянуты грунтом (рис. 1).

С тектонических позиций рудник расположен в восточном борту Магнитогорской островодужной системы девонского возраста. В древнем карьере обнаружен серпентинитовый меланж и на дне выработок вскрыт элювий гранатовых пород. Рудные минералы представлены в основном малахитом и азуритом. Малахитовые гнезда и небольшие жилки малахита содержатся в обломках родингитов коры выветривания. В котловане среди песчано-глинистых слоев обнаружена дресва, щебень, обломки базальтов и серпентинитов. Карьер имеет плоское дно и асимметричные борта: пологий восточный имеет небольшую крутизну 20° – 30° и крутой западный склон, крутизна которого достигает 70° – 80° . На западном склоне обнаружены остатки древесины, по-видимому, в период разработки этот край котлована был закреплен. Мощность наносов оценена в 1–2 м. По мнению авторов работы [17], рельеф карьера и отвалов свидетельствуют об одной технологической эпохе их формирования.

При археологических исследованиях была найдена керамика. Культурный слой длиной около 8 м был обнаружен на северном отвале рудника в его восточной части. Слой включал два горизонта, перекрытых отработанной породой. В нижнем горизонте были найдены кости домашних животных и зола, а в верхнем – остатки строительных конструкций.



10 12 Возможно, металл Глины Остатки канавы ереработанные грунть Кровля коренных пород

Профиль 8

Рисунок 3. Результаты георадарных исследований по профилю 2. а – радарограмма; б – разрез, построенный по границам интенсивных отражении радиоволн; в – геологический разрез по канаве ВК-4 [3]; 1 – современный почвенно-растительный слой; 2 – прослои погребенных почв; 3 – дресва и щебень; 4 – суглинки; 5 – родингиты с примазками медных руд; 6 – базальты.

Figure 3. Results of ground-penetrating radar studies on profile 2. a – radargram; δ – section built along the boundaries of intense reflection of radio waves; в – geologic cross-section along the VK-4 ditch [3]; 1 – up-to-date topsoil; 2 – interlayers of fossil soil; 3 – rotted rock and breakstone; 4 – loams; 5 – rodingites with adhesion of copper ores; 6 – basalts.

Рисунок 4. Результаты обработки и интерпретации по профилю 8. Figure 4. Results of processing and interpretation according to profile 8.

В ямках были найдены фрагменты керамики срубно-алакульского типа. Фрагменты посуды относились к синташтинско-петровской культуре, что дало возможность археологам отнести этапы разработки карьера к эпохам средней и поздней бронзы (около 1700–1300 лет до нашей эры).

Методика георадарной съемки

Для георадарной съемки использовался георадар SIR-3000 (GSSI) с антенной 400 МГц. Предварительно для построения карты современного рельефа рудника проведена нивелировка карьера. Топографическая съемка проведена на площади 3500 м². Расстояние между профилями топографической съемки было 2 м, а между точками измерений по профилю – 1 м. Современный рельеф рудника показан в виде объемного изображения (рис. 2, а) и на плане в виде изолиний (рис. 2, б). Карьер имеет максимальную глубину 4 м в западной части котлована. А максимальная высота вала 1,3 м установлена в северном отвале. На рис. 2, а с объемным изображением карьера можно отчетливо увидеть остатки от прокопанных в 1995 г. разведочных канав. Георадарная съемка была проведена на пологом дне карьера на площади 16 × 20 м. Наблюдения выполнены на 9 профилях, длина которых варьировалась от 9 до 20 м. Межпрофильное расстояние – 2 м, а шаг по профилю между точками наблюдения – 0,1 м. Перед сбором данных были выбраны следующие параметры съемки: окно времени – 90 нс, число выборок на каждую трассу – 1024, формат сбора данных – 16 разрядов, число трасс на метр – 10, число трасс в секунду на каждой точке профиля – 64.

Данные, полученные на профилях, обрабатывались по одинаковой схеме с помощью программного обеспечения RADAN 7 (GSSI) (Radan 7, User Manual, Geophysical Survey Systems. New Hampshire: Inc. (GSSI), 2015. 273 p.). Так как пе-

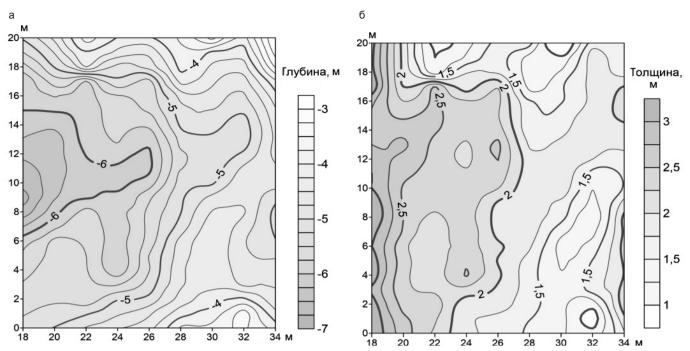


Рисунок 5. Модель рудника. а – рельеф древнего рудника в период его эксплуатации на плане в виде изолиний; б – мощность современных наносов. Глубины даны относительно современной поверхности.

Figure 5. Model of the ore district. a – relief of an ancient ore district during its operation on the plan in the form of structural contours; 6 – thickness of recent fluvial sediments. Depths are given relative to the recent surface.

репад высот на профилях достигал 1,5 м, то для корректной интерпретации результатов в наблюдения вводились поправки за рельеф. Редактирование записанной на профилях информации заключалось в коррекции позиции нулевой глубины. Кроме того, проведена фильтрация данных, использовались вертикальный фильтр в диапазоне 100–800 МГц, а также для удаления фона горизонтальный фильтр, максимальная длина фильтра выбиралась в соответствии с числом трасс (сканирований).

Результаты исследований

После обработки и интерпретации результатов георадарной съемки были построены разрезы на профилях, а затем построена модель древнего карьера. В качестве примера на рис. 3, а показан георадарный волновой разрез по профилю 2. Профиль частично совпадает с канавой ВК-4, пройденной ранее геологами [18]. На радарограммах показаны амплитуды отраженных электромагнитных волн, причем положительная часть волны закрашена черным цветом, а отрицательная – белым (рис. 3, а). По оси ординат приведено время прохода волн от антенны до отражающей границы и обратно к приемнику. Для перехода от временной шкалы к шкале расстояний (или глубин) необходимо оценить скорости электромагнитных волн, которые зависят от диэлектрической проницаемости в грунтах. Для этих целей были использованы результаты геологической съемки в шурфе, пройденном до коренных пород. Методом подбора параметров были найдены необходимые коэффициенты перевода времени в расстояния. Шкала глубин на радарограммах приведена относительно самой высокой отметки на профиле.

Интерпретация полученных волновых разрезов заключалась в выделении отражающих границ. Для обнаружения границы между техногенным грунтом и коренными породами на георадарных разрезах одними из важнейших признаков являются смена волновой картины отражений в этих средах и угловое несогласие осей синфазности отражений между ними. На приведенном разрезе наиболее контрастные границы мы дополнительно отметили черным цветом (рис. 3, а).

Построенный по данным георадара разрез по профилю 2 (рис. 3, 6), на котором приведены границы интенсивных отражении радиоволн, хорошо согласуется с разрезом (рис. 3, в), построенным геологами по канаве ВК-4 [18]. Четко прослеживается нижняя граница между наносами и кристаллическими породами, отмеченными на геологическом разрезе как родингиты и базальты. Эта граница погружается на 3 м в середине разреза. Выше выделено много прерывистых границ, созданных осадочными породами (суглинки), и техногенными или переработанными грунтами (дресва и щебень).

По результатам интерпретации георадарных данных на всех профилях выделено два комплекса: нижний, соответствующий кровле коренных пород, и верхний, связанный с наносами. Глубина до нижней границы варьирует от 3 до 7 м. На профилях 7–9 в осадочном комплексе отмечаются слабоконтрастные отражающие границы и угловое несогласие осей синфазности слоев, вызванные следами отвалов, погребенных канав и шурфов, которые были пройдены при геологическом изучении рудника.

На рис. 4 приведены результаты обработки и интерпретации профиля 8 с положением погребенных отвалов и канавы, пересекающих профиль.

Полученные на профилях данные о положении отражающих границ от кровли коренных пород были использованы для построения модели рудника во время его работы (рис. 5, а). Глубина карьера древнего рудника в восточной части со-

ставляла 4 м, в центральной части – 6 м, а максимальная глубина 7 м отмечена в западной части. Следовательно, можно сделать вывод, что ультрабазитовый массив и рудное тело имеют западное падение.

Сопоставление современных и древних границ рудника позволяет оценить мощность наносов, образовавшихся к настоящему времени (рис. 5, 6). Толщина этих грунтов варьирует в пределах от 0,5–1 м на бортах карьера и до 3 м в котловане. Причем мощность наносов увеличивается от 1 м в восточной части до 3 м в западной части котлована. Возможно, основная добыча медной руды проводилась в западном крае карьера. Объем наносов в пределах площади георадарной съемки составляет примерно 700 м³. По данным, приведенным в работах [18–19], проведена оценка количества добытой руды, которая составляла ориентировочно 4700 т медной руды. При содержании в руде от 1 до 3 % меди и коэффициенте извлечения 10 % из этого рудника могло быть получено приблизительно 5–15 т меди.

Выволы

По результатам проведенных геофизических исследований на руднике «Воровская Яма» под толстым слоем осадочных пород и переработанных грунтов удалось уверенно определить рельеф коренных пород. Построена модель древнего карьера, определено место наиболее интенсивного места добычи руды. Эти данные позволили установить, что во время разработки карьера в бронзовом веке глубина рудника достигала 7 м, а из добытой руды могло быть выплавлено от 5 до 15 т меди.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Multidisciplinary investigations of the Bronze Age settlements in the Southern Trans-Urals / ed. by. R. Krause and L. Koryakova. Bonn: Verlag Dr. Rudolf Habelt GmbH, 2013. 352 p. ResearchGate
- 2. Elsayed I. S., Alhussein A. B., Gad E., Mahfooz A. H. Shallow Seismic Refraction, Two-Dimensional Electrical Resistivity Imaging, and Ground Penetrating Radar for Imaging the Ancient Monuments at the Western Shore of Old Luxor City, Egypt // Archaeological Discovery. 2014. Vol. 2. № 2. P. 31–43. http://dx.doi.org/10.4236/ad.2014.22005
- 3. Conyers L. B. Ground-penetrating Radar for Geoarchaeology. Analytical Methods in Earth and Environmental Science. N. Y.: Wiley, 2016. 160 p. ISBN 978-1-118-94994-8. URL: https://www.wiley.com/en-ru/Ground+penetrating+Radar+for+Geoarchaeology-p-9781118949948
- 4. Tkachev V. V. An Alakul funeral and ritual site in the Eastern Orenburg region // Archaeology, Ethnology and Anthropology of Eurasia. 2012. Vol. 40, issue 1. P. 49–57. https://doi.org/10.1016/j.aeae.2012.05.006
- 5. Zaykov V. V., Yuminov A. M., Tkachev V. V. Copper mines, chromite copper ores and slags of the Ishkinino bronze age archaeological microregion, the Southern Urals // Archaeology, Ethnology and Anthropology of Eurasia. 2012. Vol. 40, issue 2. P. 37–46. https://doi.org/10.1016/j. aeae. 2012.08.004
- 6. Berseneva N. A., Epimakhov A. V., Noskevich V. V., Fedorova N. V., Tkachev V. V. Reconstruction of the ancient bronze age copper quarries using GPR // 22nd European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, Near Surface Geoscience. Barcelona, 2016. P. 1–4. http://dx.doi.org/10.3997/2214-4609.201602028
- 7. Zaykov V. V., Yablonsky L. T., Dashkovsky P. K., Zaykova E. V., Yuminov A. M. Platinoid microinclusions of a native osmium group in ancient gold artifacts from Siberia and the Urals as a source of geoarchaeological information // Archaeology, Ethnology and Anthropology of Eurasia. 2016. № 44(1). P. 93–103. http://dx.doi.org/10.17746/1563-0102.2016.44.1.093-103
- 8. Zaykov V. V., Kotlyarov V. A., Zaykova Ĕ. V., Melekestseva Y. U. The Phenomenon of the Influence of Gold Melt on Microinclusions of Platinum Group Minerals in Ancient Gold Objects // Archaeometry. 2016. № 59(1). P. 96–104. http://dx.doi.org/10.1111/arcm.12234
- 9. Tkachev V. V. Cultural landscapé formation within thé Ural-Mugodzháry Region in the Late Bronze Age: Development of copper ore resources and a strategy of adaptation to the mountain-steppe ecosystem // Stratum Plus. 2017. № 2. P. 205–230.
- 10. Юминов А. М., Зайков В. В., Коробков В. Ф., Ткачев В. В. Добыча медных руд в бронзовом веке в Мугоджарах // Археология, этнография и антропология Евразии. 2013. № 55(3). С. 87–96.
- 11. Зайков В. В., Юминов А. М., Анкушев Ѝ. Н., Ткачев В. В., Носкевич В. В., Епимахов А. В. Горно-металлургические центры бронзового века в Зауралье и Мугоджарах // Изв. ИГУ. Сер. «Геоархеология. Этнография. Антропология». 2013. № 1 (2). С. 174–195.
- 12. Носкевич В. В., Федорова Н. В., Ткачев В. В., Байтлеу Д. А., Юминов А. М. Реконструкция древних медных карьеров бронзового века по георадарным данным // Геофизика. 2017. № 1. С. 56–62. URL: http://geofdb.com/articles/view?id=1869
- 13. Conyers L. B. Interpreting Ground-penetrating Radar for Archaeology. London: Taylor and Francis, 2016. 220 p.
- 14. Ground penetrating radar theory and applications / ed. by M. H. Jol. Amsterdam: Elsevier, 2009. 544 p. ISBN 978-0-444-53348-7. https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53348-7.X0001-4
- 15. Финкельштейн М. И., Кутев В. А., Золотарев В. П. Применение радиолокационного подповерхностного зондирования в инженерной геологии. М.: Недра, 1986. 128 с.
- 16. Зайков В. В., Зданович Г. Б., Юминов А. М. Медный рудник бронзового века «Воровская яма» на Южном Урале // Россия и Восток: проблемы взаимодействия: материалы конференции. Челябинск: ЧГУ, 1995. С. 157–162.
- 17. Зайков В. В., Зданович Г. Б., Юминов А. М. Воровская яма новый рудник бронзового века на Южном Урале // Археологический источник и моделирование древних технологий: тр. музея-заповедника Аркаим. Челябинск: Археологический центр Аркаим, 2000. С. 112–130. 18. Ткачев В. В. Кожумбердынская культурная группа в контексте концепции культурного ландшафта и индоиранской проблематики // Изв. ИГУ. Сер. «Геоархеология. Этнология. Антропология». 2016. Т. 16. С. 66–87.
- 19. Зайков В. В. Геолого-минералогические исследования древних медных рудников на Южном Урале // Археология, этнография, антропология Евразии. 2005. № 4(24). С. 101–114.

Статья поступила в редакцию 10 мая 2018 г.

https://doi.org/10.21440/2307-2091-2018-4-61-67

УДК 550.8.056

Using the ground penetrating radar method for research of the ancient "Vorovskaya Yama" copper mine in the South Ural

Vladislav Vital'evich NOSKEVICH'. Natal'ya Vasil'evna FEDOROVA*

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

Relevance. Integral to research in archeology, geophysical methods allow the study of buried monuments without destroying the soil layer and provide an opportunity to more accurately determine the place of future expensive and laborious archaeological excavations. In the steppe zone of the Southern Urals and the Mugodzhar Hills, about three dozen ancient copper mines are known, the development of which took place in the Bronze Age. At present, the bottom is covered with a thick layer of sediment, and the sides of an open pit have earthflows. In the study of ancient mines, it is important to determine the relief of pits and localise the sites of ore mining during their operation, which allows us to estimate the amount of ore

Purpose of the research. The determination of reflecting boundaries using the ground penetrating radar method between loose sediment deposits and copper-bearing rocks of the Bronze Age copper mine called 'Vorovskaya Yama', design of a three-dimensional model of an ancient open-pit mine and determination of the ore mining site.

Justification of the ground penetrating radar method and research methods. The effectiveness of the ground penetrating radar method depends on the contrast of the dielectric permittivity of the layers in the studied environment. In this case, it is a sedimentary complex represented by manmade soils, and bedrock, which determine the surface of the pit during its development. The bedrock has a significant contrast in dielectric permittivity compared with the sedimentary complex at least twice. This circumstance makes it possible to determine the reflection response from the bedrock boundary. The ground penetrating radar survey at the Vorovskaya Yama open pit was conducted by radar SIR-3000 in nine parallel profiles with a length of 9–20 m and a distance of 2 m between the profiles. In the profiles, the survey was carried out with a step between surveyor stations of 0.1 m. To correctly interpret the results and take into account the current topography, a topographical survey was carried out. After processing the survey data, geological radar sections were formed in the profiles.

Results of the research. After interpretation, two georadar complexes were identified in the sections: the lower, which is caused by the roof of the bedrock, and the upper one associated with man-made or processed soils. There are weak reflecting boundaries in the zone of the upper complex, which are presumably caused by traces of surface dumps, buried ditches and pits. In identifying the boundary between man-made soil and bedrocks on georadar sections, the main 'indicators' are the change in wave patterns of reflections in these environments, as well as the angular unconformity of the axes of synphasic reflections between them. After interpolating the boundaries between the profiles, a three-dimensional model of the relief of the mine was designed during the period of its development. The thickness of sediment varies within an open pit at the edge of the working from 0.5-1 m to 3 m at the bottomhole. The maximum depth of the pit in antiquity was 7 m.

Conclusion. According to the results of the georadar survey at the mine, it was possible to confidently determine the relief of bedrock under a thick layer of later sediments. A three-dimensional model of an ancient open-pit mine was designed and the place of ore mining was localised. This data allowed us to estimate the depth and volume of workings during the development of a copper deposit in the Bronze Age.

Keywords: geophysical methods, georadar, ground penetrating radar, model, copper mine, Bronze Age, South Ural.

REFERENCES

- 1. 2013, Multidisciplinary investigations of the Bronze Age settlements in the Southern Trans-Urals. Ed. by R. Krause and L. Koryakova. Bonn: Verlag Dr. Rudolf Habelt GmbH, 352 p.
- 2. Elsayed I. S., Alhussein A. B., Gad E., Mahfooz A. H. 2014, Shallow Seismic Refraction, Two-Dimensional Electrical Resistivity Imaging, and Ground Penetrating Radar for Imaging the Ancient Monuments at the Western Shore of Old Luxor City, Egypt. Archaeological Discovery, vol. 2, no. 2, pp. 31-43. http://dx.doi.org/10.4236/ad.2014.22005
- 3. Convers L. B. 2016, Ground-penetrating Radar for Geoarchaeology. Analytical Methods in Earth and Environmental Science. N. Y., 160 p. ISBN 978-1-118-94994-8. URL: https://www.wiley.com/en-ru/Ground+penetrating+Radar+for+Geoarchaeology-p-9781118949948
- 4. Tkachev V. V. 2012, An Alakul funeral and ritual site in the Eastern Orenburg region. Arkheologiya, etnografiya i antropologiya Yevrazii [Archaeology, Ethnology and Anthropology of Eurasia], vol. 40, issue 1, pp. 49-57. https://doi.org/10.1016/j.aeae.2012.05.006
- 5. Zaykov V. V., Yuminov A. M., Tkachev V. V. 2012, Copper mines, chromite copper ores and slags of the Ishkinino bronze age archaeological microregion, the Southern Urals. Arkheologiya, etnografiya i antropologiya Yevrazii [Archaeology, Ethnology and Anthropology of Eurasia], vol. 40, issue 2, pp. 37-46. https://doi.org/10.1016/j.aeae.2012.08.004
- 6. Berseneva N. A., Epimakhov A. V., Noskevich V. V., Fedorova N. V., Tkachev V. V. 2016, Reconstruction of the ancient bronze age copper quarries using GPR. 22nd European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, Near Surface Geoscience. Barcelona, pp. 1–4. http:// dx.doi.org/10.3997/2214-4609.201602028
- 7. Zaykov V. V., Yablonsky L. T., Dashkovsky P. K., Zaykova E. V., Yuminov A. M. 2016, Platinoid microinclusions of a native osmium group in ancient gold artifacts from Siberia and the Urals as a source of geoarchaeological information. Arkheologiya, etnografiya i antropologiya Yevrazii [Archaeology, Ethnology and Anthropology of Eurasia], no. 44(1), pp. 93–103. http://dx.doi.org/10.17746/1563-0102.2016.44.1.093-103. 8. Zaykov V. V., Kotlyarov V. A., Zaykova E. V., Melekestseva Y. U. 2016, The Phenomenon of the Influence of Gold Melt on Microinclusions of
- Platinum Group Minerals in Ancient Gold Objects. Archaeometry, no. 59(1), pp. 96-104. http://dx.doi.org/10.1111/arcm.12234
- 9. Tkachev V. V. 2017, Cultural landscape formation within the Ural-Mugodzhary Region in the Late Bronze Age: Development of copper ore resources and a strategy of adaptation to the mountain-steppe ecosystem. Stratum Plus, no. 2, pp. 205-230. URL: https://www.e-anthropology.com/ English/Catalog/Archaeology/STM DWL vUnZ klNw8zpC5PiY.aspx
- *

 □ ubistu@gmail.com
- https://orcid.org/0000-0002-0765-0183
- nataliavf50@mail.ru
- https://orcid.org/0000-0002-0648-0768

V. V. Noskevich, N. V. Fedorova / News of the Ural State Mining University. 2018. Issue 4(52), pp. 61-67 EARTH SCIENCES

- 10. Yuminov A. M., Zaykov V. V., Korobkov V. F., Tkachev V. V. 2013, Bronze Age mining of copper ores in the Mugodzhar Hills. *Arkheologiya*, etnografiya i antropologiya Yevrazii [Archaeology, Ethnology & Anthropology of Eurasia], no. 55 (3), pp. 87–96. (*In Russ.*) URL: https://journal.archaeology.nsc.ru/jour/article/view/37
- 11. Zaykov V. V., Yuminov A. M., Ankushev M. N., Tkachev V. V., Noskevich V. V., Epimakhov A. V. 2013, Mining and metallurgical centers of the Bronze Age in the Trans-Urals and Mugodzhar Hills. *Izvestiya Irkutskogo Gosudarstvennogo Universiteta* [The bulletin of Irkutsk State University] Series "Geoarchaeology. Ethnography. Anthropology", no.1 (2), pp. 174–195. (*In Russ.*)
- 12. Noskevich V. V., Fedorova N. V., Tkachev V. V., Baitleu D. A., Yuminov A. M. 2017, Reconstruction of the ancient copper open pit mines of the Bronze Age according to ground-penetrating radar data. *Geofizika* [Russian Geophysics], no. 1, pp. 56–62. (*In Russ.*) URL: http://geofdb.com/articles/view?id=1869
- 13. Conyers L. B. Interpreting Ground-penetrating Radar for Archaeology. London: Taylor and Francis, 2016. 220 p.
- 14. Jol M. H. (ed.) 2009, Ground penetrating radar theory and applications. Amsterdam: Elsevier, 544 p. ISBN 978-0-444-53348-7. https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53348-7.X0001-4
- 15. Finkelstein M. I., Kutev V. A., Zolotarev V. P. 1986, *Primeneniye radiolokatsionnogo podpoverkhnostnogo zondirovaniya v inzhenernoy geologii* [The use of radar subsurface sensing in engineering geology]. Moscow, 128 p.
- 16. Zaykov V. V., Zdanovich G. B., Yuminov A. M. 1995, *Mednyy rudnik bronzovogo veka "Vorovskaya yama" na Yuzhnom Urale* [Bronze Age copper mine called "Vorovskaya yama" in the Southern Urals]. *Rossiya i vostok: problemy vzaimodeystviya* [Russia and the East: cooperation problems]. *Materialy konferentsii* [Proceedings of the conference]. Chelyabinsk, pp. 157–162.
- 17. Zaykov V. V., Zdanovich G. B., Yuminov A. M. 2000, *Vorovskaya yama novyy rudnik bronzovovo veka na Yuzhnom Urale* [The Vorovskaya Yama is a new Bronze Age mine in the South Urals]. *Arkheologicheskiy istochnik i modelirovanie drevnikh tehnologiy* [Archaeological source and modeling of ancient technologies]. *Trudy muzeva-zapovednika "Arkaim"* [Works of Arkaim culture preserve]. Chelyabinsk, pp. 112–130.
- 18. Tkachev V. V. 2016, Kozhumberdyn cultural group in the context of the concept of cultural landscape and Indo-Iranian perspectives. *Izvestiya Irkutskogo Gosudarstvennogo Universiteta* [The bulletin of Irkutsk State University]. Series "Geoarchaeology. Ethnology. Anthropology", vol. 16, pp. 66–87. URL: http://izvestiageoarh.isu.ru/assets/articles/4918264635616704478.pdf
- 19. Zaykov V. V. 2005, Geological and mineralogical studies of ancient copper mines in the southern Urals. *Arkheologiya, etnografiya i antro-pologiya Yevrazii* [Archaeology, Ethnology & Anthropology of Eurasia], no. 4 (24), pp. 101–114. (*In Russ.*) URL: http://www.archaeology.nsc.ru/ru/publish/journal/doc/2005/244/7.pdf

The article was received on May 10, 2018

УДК 556.38:551.3

Техногенные трансформации гидрогеосферы Кыргызской Республики

Лидия Эргешевна ОРОЛБАЕВА*

Институт горного дела и горных технологий им. акад. У. Асаналиева, Кыргызская Республика, Бишкек

Актуальность работы. Разработка месторождений урана и золота в горных районах, отбор подземных вод и интенсивное орошение в предгорных и равнинных территориях приводят к изменениям водной составляющей экосистем территории Кыргызстана. Особенно это касается подземных вод. С трансформацией процессов геофильтрации и химического состава подземных вод на территории Кыргызской республики связаны геоэкологические изменения, требующие анализа и оценки.

Цель работы: анализ воздействия техногенных процессов различного типа на изменение свойств геологической среды и трансформацию гидрогеосферы горных геосистем в пределах территории Кыргызской Республики.

Методология исследования. В работе обобщены сведения о техногенных процессах и трансформации гидрогеосферы при разработке месторождений урана и золота в горных условиях, сопряженных с проявлением рисков опасных процессов синергетического характера. Проанализировано проявление техногенных процессов различного типа.

Результаты. Выделены факторы, влияющие на формирование водных ресурсов межгорных бассейнов. Охарактеризованы геолого-гидрогеологические, гидродинамические особенности межгорных артезианских бассейнов; дана характеристика техногенных факторов. Описаны особенности формирования и характеристика техногенеза горнодобывающего, мелиоративного и градопромышленного типа, локальные и плошадные изменения наземной и подземной гидросферы. Рассмотрены проблемы техногенного загрязнения пресных подземных вод, анализ типов загрязнения, формирования процессов подпора грунтовых вод, подтопления, вторичного засоления, активизации экзогенных геологических процессов.

Выводы. Рассмотрены основные типы техногенеза по условиям негативного воздействия на свойства геологической среды и трансформацию геофильтрационных процессов и химического состава подземных вод. Техногенные трансформации гидрогеосферы гидромелиоративного типа связаны со строительством водохранилиш, ирригационной сети и орошением. Приведены примеры сейсмической активности в районе Токтогульского водохранилиша, развития подтопления, просадки, приращений сейсмической балльности в Ош-Карасуйском оазисе. Техногенные процессы градопромышленного типа формируются на территории крупных городов Кыргызской Республики. Рассмотрены процессы загрязнения подземных вод и трансформации потоков подземных вод на территории городов Бишкек, Ош, Кара-Суу. Под действием техногенных процессов горнодобывающего, мелиоративного и градостроительного типов на территории Кыргызстана происходит трансформация химического состава подземных и поверхностных вод, процессов геофильтрации.

Ключевые слова: трансформация гидрогеосферы, геориски, техногенные процессы, подземные воды, загрязнение, подтопление.

Антропогенное давление на природную среду Тянь-Шаня и Памиро-Алая за последние десятилетия вызвало ряд отрицательных экологических последствий: в зонах техногенного воздействия изменился баланс, химический состав подземных и речных вод, активизировались связанные с ними опасные процессы и явления. Анализ, оценка и прогноз антропогенной трансформации гидрогеосферы, связанных с ней опасностей и георисков – важные элементы обеспечения устойчивого развития горных и урбанизированных территорий Тянь-Шаня и Памиро-Алая, определяющие их оптимальное использование и защищенность населения. Здесь все компоненты этой весьма сложной геосистемы находятся в теснейшей взаимосвязи, обусловливающей как взаимное развитие, так и деградацию [1, 2].

В пределах межгорных бассейнов полностью заканчиваются все гидродинамические процессы, составляя единый цикл: формирование, накопление, движение и разгрузку подземных вод. Однако сам гидродинамический процесс здесь очень сложный [3–5, 6].

Результаты исследований трансформации гидрогеосферы Тянь-Шаня и Памиро-Алая показывают, что они определяются комплексом взаимосвязанных природных и техногенных факторов (табл. 1).

На трансформации гидрогеосферы в большей степени сказываются подземная и открытая добыча полезных ископаемых, отбор подземных вод для питьевого и промышленного водоснабжения (Окружающая среда в Кыргызской Республике 2010–2014 гг. // Статистический сборник. Бишкек, 2015. 82 с.) [2, 7].

Трансформациям гидрогеосферы способствуют изменения горных ледниковых и лесных экосистем. Вызванная совокупными воздействиями природных и техногенных факторов, она приводит к существенному росту георисков. Воздействие техногенных процессов на изменение свойств геологической среды и трансформацию гидрогеосферы определяет формирование техногенеза различного типа¹ [2, 6, 8]. Так, при эксплуатации месторождений полезных ископаемых

Таблица 1. Факторы, влияющие на трансформацию гидрогеосферы.

Table 1. The factors affecting transformation of the hydrogeosphere.

Естественные факторы	Техногенные факторы		
Физико-географические	Разработка месторождений и формирование отходов горнорудного		
Изменение климата	производства		
Геолого-структурные	Ирригация		
Эндогенные и экзогенные процессы	Регулирование речного стока		
Физико-химические процессы	Отбор подземных вод		
Биохимические процессы	Прессинг горных экосистем		



https://orcid.org/0000-0002-2095-8721

формируется техногенез горнодобывающего типа. Его характерными особенностями являются глубокое изменение свойств геологической среды, трансформация процессов геофильтрации, химического состава подземных и поверхностных вод и формирование техногенного гидрогеохимического ландшафта. Разработка месторождений полезных ископаемых в горных условиях сопряжена с проявлением рисков активизации опасных процессов синергетического характера.

При формировании техногенеза мелиоративного типа на орошаемых территориях происходит незначительное влияние техногенных процессов на глубину, однако по площади они проявляются на обширных территориях, где наблюдаются вторичное засоление почв, повышение уровня грунтовых вод и развитие процессов подтопления, загрязнение подземных вод и др.

На территориях крупных городов формируется техногенез градопромышленного типа. Проявление техногенеза перечисленных типов отмечается на территории Тянь-Шаня и Памиро-Алая в пределах Кыргызской Республики (табл. 2).

Пространственные трансформации гидрогеосферы горных стран проявляются на локальных участках, на значительных площадях и линейно, повторяя конфигурацию инженерного сооружения.

Локальные изменения, происходящие на сравнительно небольшой площади и связанные с разработкой месторождений полезных ископаемых и гидротехнических сооружений (гидроэлектростанций и горных водохранилищ), проявляются в основном в пределах гидрогеологических массивов. В межгорных бассейнах, где хозяйственная деятельность наиболее интенсивна, проявляются как локальные, так и площадные изменения. Первые из них связаны с работой крупных водозаборных сооружений, магистральных каналов и равнинных водохранилищ, а вторые, охватывающие значительные площади, – с орошением и осушением территорий, а в районах крупных населенных пунктов и на орошаемых землях – и их загрязнением.

Примеры трансформации гидрогеосферы под воздействием техногенеза горнодобывающего типа

Длительная промышленная эксплуатация месторождений в высокогорных регионах Кыргызстана сопровождается многочисленными экологическими воздействиями на окружающую среду.

На территории Кыргызской Республики в хвостохранилищах общей площадью более 5276 тыс. м² сосредоточено 109 млн м³ отходов и в отвалах общей площадью 18 000 тыс. м² – более 725 млн м³. Загрязняются водный и воздушный бассейны вблизи предприятий. В условиях горных территорий природа очень хрупка и чувствительна к изменениям, которые зачастую становятся необратимыми. В высокогорных регионах берут свое начало множество рек и ручьев, которые ниже по течению используются для питьевого водоснабжения и орошения, являются источником формирования месторождений пресных подземных вод. Поэтому разработка высокогорных месторождений сопряжена с рисками их загрязнения, его распространением на равнинные территории. Имеющиеся в Кыргызстане данные [7, 9–12] свидетель-

Таблица 2. Основные типы техногенеза по условиям негативного воздействия на изменение свойств геологической среды и трансформацию гидрогеосферы.

Table 2. The main types of technogenesis under the terms of negative impact on changes in the properties of the geological environment and transformation of the hydrogeosphere.

Тип техногенеза, характер воздействия	Техногенная нагрузка	Характер техногенныхизменений свойств геологической среды и трансформации гидрогеосферы	Последствия изменений
Горнодобывающий Карьеры, горные выра- ботки, крупные водоза- борные сооружения и дренажные системы; отвалы, хвостохрани- лища	Дренаж и осушение горных выработок. Сброс дренажных и сточных вод. Водозабор для обогатительных фабрик, металлургических производств. Сооружение хвостохранилищ, отстойников, каналов. Фильтрация из хвостохранилищ, шламонакопителей. Объект воздействия — гидросфера (поверхностные и подземные воды) Прессинг горных экосистем (ледников, лесов)	Осушение гидрогеосферы зоны гипергенеза, существенное истощение естественных запасов подземных вод, деградация естественных и формирование техногенных ландшафтов; загрязнение подземных вод (локального и регионального характера), сокращение оледенения, деградация горных лесов	Истощение запасов пресных вод, иссушение или подтопле ние территории, нарушение структуры общего водного баланса Ухудшение санитарного состояния водоемов и водотоков Ухудшение качества пресных вод хозяйственно-питьевого назначения. Формирование опасных процессов синергети ческого характера
Гидромелиоративный	Система водохранилищ, ирригационных каналов, орошаемое земледелие, объекты животноводства и др.	Ухудшение биологического качества почв (вторичное их засоление), загрязнение подземных вод	Формирование ирригационны ландшафтов, подтопление, заболачивание. Приращение сейсмической балльности
Градостроительный Гражданские, промыш- ленные и гидротехниче- ские сооружения, под- земные сооружения и коммуникации крупных промышленных городов	Сложные условия взаимодействия техногенных процессов, истощение и загрязнение подземных вод и др.	Осушение водовмещающей толщи, изменение водного баланса, структуры и направленности геофильтрационных потоков, усиление взаимосвязи эксплуатируемых водоносных горизонтов с поверхностными водотоками	Истощение запасов и загрязнение пресных подземных вод

¹ Национальный доклад о состоянии окружающей среды Кыргызской Республики за 2011–2014 годы. Бишкек, 2016. 163 с.

ствуют о том, что примерно до 1960–1964 гг. гидроизоляция хвостохранилищ не выполнялась. В последующие годы для предотвращения загрязнения подземных вод в основании хвостохранилищ стали укладывать специальный водоупорный экран из слоя глины и суглинка толщиной 0,5–1,0 м или полиэтиленовую пленку.

Однако полного и достаточно длительного эффекта гидроизоляции хвостов в большинстве случаев достигнуто не было. Глинистая или суглинистая прослойка с годами теряет свою эффективность под влиянием естественных гидрогеологических процессов и сейсмичности, полиэтиленовая пленка рвется под тяжестью избыточного объема пульпы и из-за воздействия растений. Происходят инфильтрационные потери жидкой фазы хвостов, загрязняются породы зоны аэрации, затем и подземные воды. От очагов загрязнения начинается миграция токсичных или радиоактивных компонентов в подземных водах, формируется ореол загрязнения.

Наибольшую угрозу представляют хвостохранилища, размещенные в районах высокой сейсмичности, в долинах и руслах селе- и оползнеопасных рек. Это можно проиллюстрировать несколькими примерами.

В долине реки Майлуу-Суу с 1945 г. проводилась промышленная эксплуатация месторождения урана. Большая часть урановых хвостохранилищ и горных отвалов размещена в поймах р. Майлуу-Суу и ее притоков.

Отвалы и хвостохранилища являются постоянными источниками радиоактивного загрязнения гидрографической сети бассейна р. Сырдарьи в результате деградации защитных и дренажных систем, вымывания радионуклидов. Содержание радиоактивных веществ в химическом составе речных и подземных вод на локальных участках в результате инфильтрации атмосферных осадков через не имеющие гидроизоляции хвостохранилища и отвалы на 2–3 порядка выше фонового уровня [7, 12, 13]. По р. Майлуу-Суу и ее притокам с высокой повторяемостью проходят ливневые селевые потоки. В верховье р. Майлуу-Суу расположено высокогорное прорывоопасное озеро Кутман-Кель. Территория находится в районе высокой сейсмичности, подверженности оползням и трансграничного радиоактивного загрязнения поверхностных и подземных вод.

На месторождении Ак-Тюз производилась подземная и открытая добыча и обогащение свинцовых руд редкоземельных элементов. Хвостохранилища и отвалы низкой устойчивости размещены в сильно пересеченной горной местности с большим перепадом высот. В декабре 1964 г. в результате землетрясения в 5 баллов произошло катастрофическое разрушение хвостохранилища Ак-Тюзского рудника. По химическому составу ак-тюзские хвосты были представлены солями тяжелых металлов с очень высоким содержанием свинца, цинка, меди, молибдена, мышьяка и бериллия. Кроме того, хвосты содержали повышенные концентрации кадмия, вольфрама, сурьмы. Из радиоактивных элементов хвосты содержали высокие концентрации тория (800–7000 ррm) и циркона (110–4800 ррm) [7].

Разрушение неустойчивой намывной дамбы Ак-Тюзского радиоактивного хвостохранилища привело к выносу около 680 тыс. м³ торийсодержащего песка и ила по руслу р. Кичи-Кемин и арычной ирригационной сети.

Потоки хвостов радиоактивным селем распространились по руслу и долине р. Кичи-Кемин на расстояние до 40 км, произошло загрязнение почвы, речных и подземных вод.

Золоторудное месторождение Кумтор. По мере освоения запасов этого месторождения с 1998 г. нарастали масштабы и виды техногенных воздействий. Месторождение характеризуется особыми природно-климатическими условиями высокогорья (наличие активных ледников, вечной мерзлоты с подземными льдами, суровый климат с интенсивной солнечной радиацией). Спецификой производственного процесса является использование технологии цианидного вышелачивания золота.

Наиболее серьезным экологическим воздействием на гидросферу территории рудника Кумтор являются риски, связанные с крупномасштабным техногенным прессингом на окружающие ледники (разгрузка льда, удаление ледников, складирование на ледниках грандиозных масс отвальных и пустых пород из карьеров). Мощное прямое и косвенное воздействие на близлежащие ледники в течение почти 20 лет вызвали их усиленное таяние и деградацию, а в случае с ледником Давыдова – разрушение [7, 14]. Последствиями мощного техногенного прессинга на ледники стало постепенное загрязнение поверхностных вод и речных (донных) отложений в бассейне р. Кумтор сульфатами, нитратами и сопутствующими золоту минералами, включающими соединения тяжелых металлов. Национальные и международные эксперты отмечают, что загрязнение водных ресурсов в районе Кумтора и подземных вод ниже по течению будет продолжаться в течение длительного времени после закрытия рудника.

Примеры трансформации гидрогеосферы под воздействием техногенеза гидромелиоративного типа

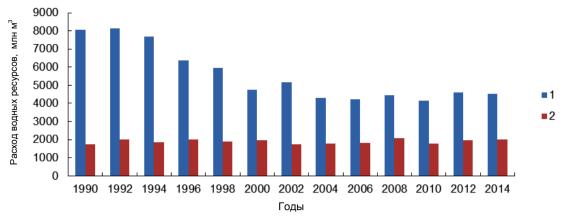
Масштабное развитие техногенеза гидромелиоративного типа связано, прежде всего, со строительством водохранилищ и орошением. Источниками ирригационного назначения в Кыргызстане являются 40 водохранилищ сезонного регулирования, где сосредоточено 2,5 км³ воды [9–11].

Дополнительные нагрузки на кровлю литосферы водохранилища формируют геориски, вызывая индуцированные землетрясения, обводнения тектонических разломов, изменения порового давления.

В Токтогульском водохранилище многолетнего регулирования и ирригационно-энергетического использования объемом 19 500 млн м³ при напоре воды 100 м в 1977 г. увеличилось число слабых землетрясений с гипоцентром на глубине 5 км близ плотины. В 1979 и 1980 гг. при наполнении водохранилища более 17 км³ число землетрясений резко возросло, эпицентры распределились вокруг водоема на расстоянии от 15 до 20 км, гипоцентр достиг глубины 8 км.

Ирригационная сеть, включающая магистральные каналы в земляных руслах, за исключением небольших отрезков Большого Чуйского (БЧК) и Таласского каналов, характеризуются величиной КПД 0,6–0,7, редко 0,8.

Длительная эксплуатация ирригационных систем с низким КПД способствовала необратимой трансформации зоны гипергенеза прилегающих территорий: повышался уровень грунтовых вод, развивалось подтопление, трансформировался химический состав подземных вод, менялась зона аэрации, развивались процессы вторичного засоления. Трансформация гирогеосферы, связанная с техногенными процессами гидромелиоративного профиля, сопряжена с отбором значительного количества поверхностных и подземных вод, используемых для орошения, обводнения паст-



Использование водных ресурсов за период с 1990 по 2014 г. 1 – орошение и сельскохозяйственное водоснабжение; 2 – потери воды при транспортировке.

Use of water resources for the period from 1990 to 2014. 1 – irrigation and agricultural water supply; 2 – water losses while transportation.

бищ и сельскохозяйственного водоснабжения [12–15]. Использование водных ресурсов на орошение и сельскохозяйственное водоснабжение сопровождается значительными потерями при транспортировке (см. рисунок).

К примерам трансформации гидрогеосферы мелиоративного профиля относятся процессы в Ош-Карасуйском оазисе [9]. Здесь под влиянием инфильтрации из ирригационных сооружений скорость подъема уровня грунтовых вод в среднем за 70 лет составляла до 1,5 м/год, что привело к подтоплению, заболачиванию, засолению, просадкам, тиксотропии, дилатансии, сейсмопросадкам, приращению сейсмической балльности.

Примеры трансформации гидрогеосферфы под воздействием техногенеза градостроительного типа

Воздействие техногенеза градостроительного типа отмечается площадной трансформацией подземной гидросферы территорий крупных городов (Бишкек, Кара-Балта, Ош, Чолпон-Ата и др.). Трансформация химического состава поверхностных и подземных вод связана со смешанным загрязнением за счет бытовых и промышленных стоков, а также орошения городских территорий.

Примером могут служить Алаарчинское и Орто-Алышское месторождения подземных вод, используемые для водоснабжения г. Бишкека, где верхняя часть четвертичного водоносного горизонта практически на глубину до 150 м является загрязненной. Загрязнение подземных вод в значительной степени обусловлено загрязнением окружающей среды в целом – поверхности Земли (почвы, поверхностных вод, атмосферы и атмосферных осадков). Здесь отмечается загрязнение нитратами, шестивалентным хромом, сульфатами выше ПДК, увеличивается жесткость воды.

При техногенном загрязнении пресных подземных вод на действующих водозаборах, используемых для водоснабжения, подземные воды теряют свои питьевые качества, снижаются эксплуатационные запасы [1, 6].

Трансформация геофильтрации потоков подземных вод связана с отбором пресных подземных вод для питьевого и промышленного водоснабжения.

Ош-Карасуйский оазис является густонаселенным южным регионом Кыргызской Республики, здесь расположены города Ош и Кара-Суу, где наряду с проблемами загрязнения подземных вод пестицидами и нитратами и подтоплением существует проблема истощения запасов подземных вод. Опробование скважин восточной и западной части городов Ош и Кара-Суу показало, что подземные воды здесь некондиционные. Основной причиной этого является усиление гидравлической взаимосвязи эксплуатируемого водоносного горизонта с сопряженным водоносным горизонтом неогена и подток солоноватых вод в эксплуатируемый водоносный горизонт четвертичных отложений [3]. Указанный факт свидетельствует об истощении ресурсов пресных подземных вод в процессе их эксплуатации. Питьевая вода при этом имеет минерализацию 1,3–2,0 г/л, в ней повышено содержание сульфатов и хлоридов.

Нитратное загрязнение подземных вод с концентрацией нитратов 1,5–2,0 ПДК отмечается в западной части г. Ош и на его северной окраине.

Выводы

Анализ процессов трансформации гидрогеосферы Тянь-Шаня и Памиро-Алая показывает, что они определяются комплексом взаимосвязанных природных и техногенных факторов. Под действием техногенных процессов горнодобывающего, мелиоративного и градостроительного типов на территории Кыргызстана происходит трансформация химического состава подземных и поверхностных вод, процессов геофильтрации. Выделены основные типы техногенеза по условиям негативного воздействия на изменение свойств геологической среды и трансформацию гидрогеосферы.

Техногенные процессы горнодобывающего типа активно проявляются на территории размещения отвалов и хвостохранилищ рудных и радиоактивных отходов в долинах рек Майлуу-Суу и Кара-Киче, являются постоянными источниками загрязнения и характеризуются селевой и оползневой опасностью.

Техногенез градопромышленного профиля развит на территории крупных городов Бишкек и Ош, в результате чего происходит трансформация химического состава подземных вод, изменение структуры потоков подземных вод.

Техногенные процессы мелиоративного профиля проявляются на территории Кыргызстана подъемом уровня грунтовых вод и развитием процессов подтопления, засоления и просадки, приращением сейсмической балльности.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Оролбаева Л. Э. Подземные воды Кыргызстана: проблемы использования и сохранения // Горный журнал. 2016. № 8. С. 41–47. https://dx.doi.org/10.17580/gzh.2016.08.08
- 2. Баева Н. Б., Толстихина Г. Г. Эколого-гидрогеологические условия Кыргызстана // Вода и устойчивое развитие Центральной Азии: матер. Междунар. науч.-практ. конф. Бишкек: Элита, 2001. С. 126–130.
- 3. Мамасериков Т. Н., Толстихин Г. М. Особенности формирования эксплуатационных запасов пресных подземных вод Бишкекской площади // Вестник КРСУ. 2002. Т. 2, № 4. С. 101–108. URL: https://www.krsu.edu.kg/vestnik/2002/v4/a14.html
- 4. Торгоев И. А., Алешин Ю. Г. Экология горнопромышленного комплекса Кыргызстана. Бишкек: Илим, 2009. 193 с.
- 5. Плотников Н. И. Введение в экологическую гидрогеологию. М.: Изд-во МГУ, 1998. 240 с.
- 6. Brunet M.-F., Sobel E. R., McCann T. Geological evolution of Central Asian Basins and the western Tien Shan Range // Geological Society Special Publication. 2017. Vol. 427, issue 1. P. 1–17. https://doi.org/10.1144/SP427.17
- 7. Злобина В. Л., Медовар Ю. А., Юшманов И. О. Трансформация состава и свойств подземных вод при изменении окружающей среды. М.: Мир науки, 2017. ISBN 978-5-9500228-8-3. URL: http://izd-mn.com/PDF/21MNNPM17.pdf
- 8. Орлов М. С., Питьёва К. Е. Гидрогеоэкология городов. М.: Инфра, 2013. 287 с.
- 9. Оролбаева Л. Э., Мелешко А. А. Синергетические эффекты при формировании георисков в бассейнах горных рек Тянь-Шаня // Изв. УГГУ. 2016. № 3. С. 20–24. https://doi.org/10.21440/2307-2091-2016-3-20-24
- 10. Торгоев И. А. Ледники, золото и геоэкология Кумтора. Бишкек, 2016. 197 с.
- 11. Galitskaya I. V., Rama Mohan K., Keshav Krisha Á., Batrak G. I., Eremina O. N., Putilina V. S., Yuganova T. I. Assessment of soil and Ground-water Contamination by Heavy Metals and Metalloids in Russian and Indian Megacities // Procedia Earth and Planetary Science. 2017. Vol. 17. P. 674–677. https://doi.org/10.1016/j.proeps.2016.12.180Get
- 12. Ping Wang, Jingjie Yu, Yichi Zhang, Changming Liu. Groundwater recharge and hydrogeochemical evolution in the Ejina Basin, northwest China // Journal of Hydrology. 2013. Vol. 476. P. 72–86. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.10.049

 13. Ming Han, Chengyi Zhao, Jirka Simunek, Gary Feng. Evaluating the impact of groundwater on cotton growth and root zone water balance
- 13. Ming Han, Chengyi Zhao, Jirka Simunek, Gary Feng. Evaluating the impact of groundwater on cotton growth and root zone water balance using Hydrus-1D coupled with a crop growth model // Agricultural Water Management. 2015. Vol. 160. October. P. 64–75. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.06.028
- 14. Dajun Qin, Yunping Qian, Liangfeng Han, Zhimin Wang, Chen Li, Zhanfeng Zhao. Assessing impact of irrigation water on groundwater recharge and quality in arid environment using CFCs, tritium and stable isotopes, in the Zhangye Basin, Northwest China // Journal of Hydrology. 2011. Vol. 405, issues 1–2. P. 194–208. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.05.023
- 15. Цыценко К. В., Бажанова Л. В. Располагаемые водные ресурсы Кыргызстана: их структура и динамика // Вестник КРСУ. 2015. Т. 15. № 3. С. 194–198. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=23396594

Статья поступила в редакцию 1 августа 2018 г.

УДК 556.38:551.3

https://doi.org/10.21440/2307-2091-2018-4-68-73

Technogenic transformations of the hydrogeosphere of the Kyrgyz Republic

Lidiya Ergeshevna OROLBAEVA*

orolbaeval@mail.ru

Academician Asanaliev Institute of Mining and Mining Technologies, Bishkek, Kyrgyzstan

Relevance of the work. The development of uranium and gold deposits in mountainous areas, intake of groundwater and strong irrigation in the submontane areas and even land lead to changes in the water component of ecosystems of the territory of Kyrgyzstan. This is especially true of groundwater. Geo-ecological changes that require analysis and evaluation are associated with the transformation of geofiltration and the chemical composition of groundwater in the Kyrgyz Republic.

Purpose of work: analysis of the impact of various types of technogenic processes on changes in the properties of the geological environment and transformation of the hydrogeosphere of mountain geosystems within the territory of the Kyrgyz Republic.

Methodology of research. This paper summarizes information on technogenic processes and the transformation of the hydrogeosphere in the development of uranium and gold deposits in mountainous conditions associated with the risks of hazardous processes of a synergistic nature. Technogenic processes of various types were analyzed.

Results. The factors affecting the formation of water resources of intermountain basins are highlighted. The geological, hydrogeological, hydrodynamic features of intermountain artesian basins are characterized; the characteristic of technogenic factors are given. The features of the formation of techogenesis are described; the definition of technogenesis of mining, reclamative and industrial type is specified; some local and area changes in the surface and underground hydrosphere are given. This paper deals with some problems concerning technogenic pollution of fresh groundwater, the analysis of types of pollution, the formation of processes for groundwater dam, saturation, resalting, and activation of exogenous geological

Conclusions. The main types of technogenesis are considered according to the conditions of negative impact on the properties of the geological environment and the transformation of geofiltration processes and the chemical composition of groundwater. Technogenic transformations of hydro land reclaiming type of hydrogeosphere are associated with the construction of reservoirs, irrigation networks and irrigation itself. This paper gives the examples of seismic activity in the area of the Toktogulsky reservoir, development of saturation, contraction, and increasing measures of earthquake intensity in the Osh-Karasuysky oasis. Technogenic processes of a city-industrial type are formed within the territory of large cities of the Kyrgyz Republic. The processes of pollution of groundwater and the transformation of groundwater flows in the territory of the cities of Bishkek, Osh, Kara-Suu are considered. Under the influence of technogenic processes of mining, reclamative and industrial types in the territory of Kyrgyzstan, there is a transformation of the chemical composition of groundwater and surface water, as well as geofiltration processes.

Keywords: transformation of hydrogeosphere, geohazard, technogenic processes, groundwater, pollution, saturation.

REFERENCES

- 1. Orolbaeva L. E. 2016, Groundwater of Kyrgyzstan: Issues of use and preservation. Gornyi Zhurnal [Mining journal], no. 8, pp. 41-47. https:// dx.doi.org/10.17580/gzh.2016.08.08
- 2. Baeva N. B., Tolstikhina G. G. 2001, Ekologo-gidrogeologicheskiye usloviya Kyrgyzstana [Ecological and hydrogeological conditions of Kyrgyzstan]. Water and sustainable development of Central Asia: proceedings of International scientific conference. Bishkek, pp. 126–130.
- 3. Mamaserikov T. N., Tolstikhin G. M. 2002, Features of formation of mineable reserves of fresh groundwater of the Bishkek area. Vestnik KRSU [Bulletin of the Kyrgyz-Russian Slavic University], vol. 2, no. 4, pp. 101–108. (In Russ.) URL: https://www.krsu.edu.kg/vestnik/2002/v4/a14.html 4. Torgoev I. A., Aleshin Yu. G. 2009, Ekologiya gornopromyshlennogo kompleksa Kyrgyzstana [Ecology of the mining complex of Kyrgyzstan]. Bishkek, 193 p.
- 5. Plotnikov N. I. 1998, Vvedeniye v ekologicheskuyu gidrogeologiyu [Introduction to environmental hydrogeology]. Moscow, 240 p.
- 6. Brunet M.-F., Sobel E. R., McCann T. 2017, Geological evolution of Central Asian Basins and the western Tien Shan Range. Geological Society Special Publications, vol. 427, issue 1, pp. 1-17. https://doi.org/10.1144/SP427.17
- 7. Zlobina V. L., Medovar Yu. A., Yushmanov I. O. 2017, Transformatsiya sostava i svoystv podzemnykh vod pri izmenenii okruzhayushchey sredy [Transformation of the composition and properties of groundwater when the environment changes occur]. Moscow. ISBN 978-5-9500228-8-3. URL: http://izd-mn.com/PDF/21MNNPM17.pdf
- 8. Orlov M. S., Pityeva K. E. 2013, Gidrogeoekologiya gorodov [Hydrogeoecology of cities]. Moscow, 287 p.
- 9. Orolbaeva L. E., Meleshko A. A. 2016, Synergistic effects in the formation of geohazards in the basins of the mountain rivers of the Tien Shan. Izvestiya UGGU [News of the Ural State Mining University], no. 3, pp. 20-24. https://doi.org/10.21440/2307-2091-2016-3-20-24
- 10. Torgoev I. A. 2016, *Ledniki, zoloto i geoekologiya Kumtora* [Glaciers, gold and geoecology of Kumtor]. Bishkek, 197 p.
 11. Galitskaya I. V., Rama Mohan K., Keshav Krisha A., Batrak G. I., Eremina O. N., Putilina V. S., Yuganova T. I. 2017, Assessment of soil and Groundwater Contamination by Heavy Metals and Metalloids in Russian and Indian Megacities. Procedia Earth and Planetary Science, vol. 17, pp. 674–677. https://doi.org/10.1016/j.proeps.2016.12.180
- 12. Ping Wang, Jingjie Yu, Yichi Zhang, Changming Liu. 2013, Groundwater recharge and hydrogeochemical evolution in the Ejina Basin, northwest China. *Journal of Hydrology*, vol. 476, pp. 72–86. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.10.049
- 13. Ming Han, Chengyi Zhao, Jirka Simunek, Gary Feng. 2015, Evaluating the impact of groundwater on cotton growth and root zone water balance using Hydrus-1D coupled with a crop growth model. Agricultural Water Management, vol. 160, October, pp. 64–75. https://doi.org/10.1016/j.
- 14. Dajun Qin, Yunping Qian, Liangfeng Han, Zhimin Wang, Chen Li, Zhanfeng Zhao. 2011, Assessing impact of irrigation water on groundwater recharge and quality in arid environment using CFCs, tritium and stable isotopes, in the Zhangye Basin, Northwest China. Journal of Hydrology, vol. 405, issues 1–2, pp. 194–208. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.05.023
- 15. Tsytsenko K. V., Bazhanova L. V. 2015, Disposable water resources of Kyrgyzstan: their structure and dynamics. Vestnik KRSU [Bulletin of the Kyrgyz-Russian Slavic University], vol. 15, no. 3, pp. 194–198. (In Russ.) URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=23396594

The article was received on August 1, 2018

* Morolbaeval@mail.ru



Texнические науки Engineering sciences

УДК 62-752

https://doi.org/10.21440/2307-2091-2018-4-74-83

Mathematical simulation of joint work of a vibration isolator group with quasi-zero stiffness

Anvar Rashitovich VALEEV, Aleksey Nikolaevich ZOTOV, Marat Midhatovich GALIULLIN, Timur Airatovich YANBARISOV

Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia

The relevance of the work is due to the need to develop new means of highly efficient vibration protection. One such means is a vibration isolator with quasi-zero stiffness. They are quite sensitive elements, so the problem of designing and operating vibration isolators with quasi-zero stiffness is relevant. Nowadays, comprehensive studies on their work within a group have not yet conducted.

Purpose of the work is to study the sensitivity of vibration isolators with quasi-zero stiffness to the errors of geometric parameters while their manufacture. **Methodology of research**. This work is a continuation of the experimental studies of plate-type universal vibration isolators with quasi-zero stiffness. For the research, an analytical study and a computer-based multiple experimental procedure with random input data were used.

Results. Analytical studies show that vibration isolators with quasi-zero stiffness are very sensitive objects. Basic properties, such as workload and stiffness under workload, largely depend on key parameters. Vibration isolators of plate type have a very strong dependence of the workload on the external and internal radii, the height of the cone and the wall thickness. The dynamics of a group of vibration isolators was analysed. Due to the deviation of different parameters and the nonlinearity of the power characteristics, the behaviour of the group does not coincide with the average behaviour of one vibration isolator. It has been found that for a group of isolators there is a slight increase in workload. Moreover, deviations in parameters lead to a decrease in stiffness.

Conclusions. The high sensitivity of installed vibration isolators with quasi-zero stiffness proves that they require careful attention and high precision in manufacturing. The resulting deviations of the behaviour of a group of vibration isolators from the behaviour of a single vibration isolator indicate the need to enter appropriate corrections when designing them, otherwise this may lead to loss of stability and instability of the equipment, which should be avoided.

Keywords: vibration, vibration isolator, quasi-zero stiffness, mathematical simulation, nonlinear oscillations, sensitivity.

I ntroduction

A significant part of modern equipment is characterised by high power, and its work is accompanied by high noise and vibration. These factors negatively affect equipment and personnel.

The high level of vibratory background noise accelerates the wear of equipment, bearing assembly and bases. In addition, noise creates uncomfortable working conditions and can cause chronic diseases [1-3]. Laboratory and high-precision equipment also have the problem of vibration protection. The need for protection from vibration arises in everyday life, for example, in washing machines [4].

Various methods can be used for noise and vibration protection: an increase in the mass of equipment, vibration isolation, and the use of dynamic dampers. From a practical point of view, the most convenient way is vibration isolation. Traditional spring and rubber vibration isolators are well suited only for standard conditions, but their use is complicated under special conditions, in particular, if it is necessary to obtain a high coefficient of vibration isolation with small dimensions.

For high-quality vibration isolation, it is necessary to have a low natural frequency of the entire system. But traditional vibration isolators, in fact, are an elastic linear mechanical system with large dimensions. This problem can be solved with the help of vibration isolators with a low natural frequency.

Vibration isolators with quasi-zero stiffness are elastic nonlinear mechanical systems with a section with a small (or low) stiffness value. Also, these systems are sometimes called "systems with low stiffness" [5]. In foreign literature one can come across the term "systems with high-static-low-dynamic-stiffness" [5, 6]. The principal view of the power characteristic is presented in Fig. 1.

Vibration isolators with quasi-zero stiffness represent a very promising development in mechanical engineering. They can prove well in various areas: industrial machines and equipment, vibration control of heavy vehicles, workstations, manual machines, marine engines, close control and aerospace equipment, etc. Vibration isolators with quasi-zero stiffness provide both high static load and low dynamic stiffness. The low stiffness of the system with a significant static load reduces the natural frequency of oscillation to less than 1 Hz and allows you to get rid of a wide range of vibration with high efficiency.

P. Alabuzhev studied vibration isolators with quasi-zero stiffness. He analysed various types of passive systems with quasi-zero stiffness [5]. A. Carrella is also known for analysing quasi-zero stiffness by means of two inclined springs [6] or two compressed rods [7–9]. The observation of the "scissors" system with a spring for obtaining quasi-zero stiffness was done by X. Sun et al.



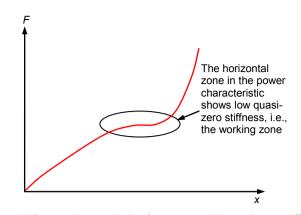


Figure 1. Power characteristic of a system with quasi-zero stiffness. Рисунок 1. Силовая характеристика системы с квазинулевой жесткостью.

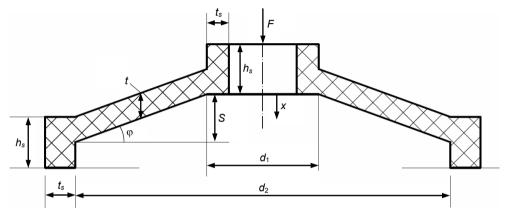


Figure 2. Plate-type vibration isolator with quasi-zero stiffness. Рисунок 2. Виброизолятор с квазинулевой жесткостью тарельчатого типа.

[10]. These systems can also be obtained using pneumatic active elements, as described in [11]. Pneumatics are also used by M. Holtz and J. Van Niekerk for seat suspension [12]. The application of the quasi-zero stiffness effect for special isolators of cables is studied by Y. K. Ponomarev [13, 14]. Another type of special cable is studied by P. Tapia-Gonzales and others in [15]. In addition, systems with quasi-zero stiffness of the passive type are proposed by T. Le and K. Ahn [16] and I. Matseevsky [17].

There is also a new prototype vibration isolator with quasi-zero stiffness, based on folding paper cylinders with torsional buckling [18]. Experimental research shows that the elimination of oscillations occurs at frequencies greater than 6 Hz. It is also known that it is possible to obtain quasi-zero stiffness with cammed spring mechanisms [19].

Systems with quasi-zero stiffness can also be obtained by active or semi-active methods. A suspension system with semi-active devices was proposed by J. Choi and others [20, 21]. An electromagnetic actuator with linear characteristic is used by Kh. Khan and others [22]. The electric servomotor with a ball-and-screw unit is also actively used as a power suspension drive by M. Kawana and T. Shimogo [23]. Electromagnetic systems are presented by V. Robertson and others [24]. Unfortunately, active systems with quasi-zero stiffness are usually quite expensive. Systems with quasi-zero stiffness, controlled by a rotary drive, are presented by D. Ning et al. [25]. There is also a vibration isolator developed by Y. Zheng and others [26]. It is implemented by connecting a magnetic spring with negative stiffness parallel to the springs of the membranes in order to compensate for its positive stiffness. An isolator consists of two coaxial magnetic rings that have axial magnetisation, and their directions of magnetisation are the same. Quasi-zero stiffness can also be obtained using the suspension system of an off-road vehicle using intelligent active power control [27].

Quasi-zero stiffness can also be used to create an elastic suspension for equipment shafts [28]. In this case, it is possible to minimise the transmission of dynamic effects from the rotor to the pump or compressor casing.

Often, systems with quasi-zero stiffness are characterised by design complexity. Tests by authors and other scientists show that the practical implementation of systems with quasi-zero stiffness is rather complicated. Any significant parameter deviation may impair the operation of the vibration isolator. It is also possible that serially manufactured vibration isolators installed in one equipment may differ, and, accordingly, their behaviour may slightly deviate from the predicted one.

As follows from the experience of the authors and other scientists, vibration isolators with quasi-zero stiffness are, on the whole, quite sensitive to changes in geometric parameters. This leads to the need for careful adjustment. The use of such a vibration isolator requires studying the possibility of deviating the parameters and analysing their influence on the effectiveness of vibration isolation. Moreover, usually prototypes of vibration isolators with quasi-zero stiffness are developed separately. But it is obvious that at least four vibration isolators are required for machines or equipment, to ensure better stability as well. It is important to know the difference in behaviour between one vibration isolator and a group of vibration isolators.

Thus, the purpose of this study is to analyse the sensitivity of the characteristics of a vibration isolator with quasi-zero stiffness when changing geometric parameters, as well as analysing the behaviour of a group of vibration isolators with several different parameters.

Mathematical model of plate-type vibration isolator with quasi-zero stiffness

A tray-type spring of a disc without any changes in the design is difficult to apply, because it has a quasi-zero stiffness when it is flat (the height of the cone h is zero), i.e. fully incorporated into the base. On the other hand, the tray-type spring should have room for deformation; therefore, something like support should be used. This design of an isolator is shown in Fig. 2. To distinguish these two designs, an isolator in Fig. 2 is called "dome-shaped."

For further description of the vibration isolator with quasi-zero stiffness, the following parameters are used (Table 1). The detailed derivation of the formulas in this paper is not shown.

The relationship between the load F on the vibration isolator and its compression x is determined by the formula [29]:

$$F(x) = \pi t E\left(\frac{t^2}{(r_2 - r_1)(r_1 + r_2(2k_v - 3)) + 2r_2^2(1 - k_v)\ln(r_2 / r_1)} \cdot \frac{x}{3} + \frac{1}{4 \cdot \ln(r_2 / r_1)} \cdot \frac{8S^2 x - 12Sx^2 + 4x^3}{(r_2 - r_1)^2}\right). \tag{1}$$

The optional coefficients k and k are described as

$$k_s = \frac{t^3 d_2}{8t \, h_s^3};\tag{2}$$

$$k_{v} = \frac{\ln(r_{2}/r_{1}) - (1 - (r_{1}/r_{2}))}{k_{+} + \ln(r_{2}/r_{1})}.$$
(3)

The height of the cone wall

$$S = \frac{1}{\sqrt{3}} t \left(r_2 - r_1 \right) \sqrt{\frac{\ln \left(r_2 / r_1 \right)}{\left(r_2 - r_1 \right) \left(r_1 + r_2 \left(2k_v - 3 \right) \right) + 2r_2^2 \left(1 - k_v \right) \ln \left(r_2 / r_1 \right)}}.$$
 (4)

Operating load

$$F = \frac{\pi / (3\sqrt{3})t^{4}E(r_{2} - r_{1})\sqrt{\ln(r_{2}/r_{1})}}{((r_{2} - r_{1})(r_{1} + r_{2}(2k_{v} - 3)) + 2r_{2}^{2}(1 - k_{v})\ln(r_{2}/r_{1}))^{1.5}}.$$
(5)

Maximum stress in the wall of the vibration isolator

$$\sigma = \frac{F}{\left(\pi/3\right)t^2} \left(\frac{r_2\left(1-k_v\right)}{r_1} - 1\right). \tag{6}$$

For further analysis, the stiffness of the vibration isolator should be taken into account:

$$k = \frac{dF}{dx}.$$

Table 1. Description of parameters of a plate-type isolator with stiffness.

Таблица 1. Описание параметров изолятора с квазинулевой жесткостью тарельчатого типа.

Criterion	Physical meaning
Compression of vibration isolator x, m	Variable
Capacity of vibration isolator $F(x)$, H	Elastic force of vibration isolator
Operating load of vibration isolator F, H	Capacity of vibration isolator with minimum hardness
Thickness of the cone t, m	Geometric parameter of vibration isolator
Inner radius of vibration isolator r_1 , m	Geometric parameter of vibration isolator
Outer radius of vibration isolator r_2 , m	Geometric parameter of vibration isolator
Young's modulus E, Pa	Describes the properties of an isolator material
Optional coefficient k_s	Characterises the shape of the outer wall for a thick or rigid wall. The value k_s tends to zero.
Optional coefficient $k_{_{\scriptscriptstyle v}}$	Shows the effect of the outer wall on hardness. For a thin outer wall, the value $k_{_{\scriptscriptstyle \odot}}$ tends to zero.
Maximum height of the inner cone \mathcal{S} , m	Geometric parameter of vibration isolator
Pressure wall thickness $t_{\rm s}$, m	Geometric parameter of vibration isolator
Height of the sustaining wall h_s , m	Geometric parameter of vibration isolator
Stress σ, PA	Maximum stress in vibration isolator in static condition
Hardness k, N/m	Hardness of the vibration isolator in the direction of compression

After changes:

$$k = \pi E t \left[\frac{t^2 / 3}{\left(r_2 - r_1\right) \left(r_1 + r_2\left(2k_v - 3\right)\right) + 2r_2^2 \left(1 - k_v\right) \ln\left(r_2 / r_1\right)} + \frac{1}{\ln\left(r_2 / r_1\right)} \cdot \frac{2S^2 - 6Sx + 3x^2}{\left(r_2 - r_1\right)^2} \right]. \tag{7}$$

Stiffness of vibration isolator at the operating point

$$k = \pi E t \left[\frac{t^2 / 3}{\left(r_2 - r_1\right)\left(r_1 + r_2\left(2k_v - 3\right)\right) + 2r_2^2\left(1 - k_v\right)\ln\left(r_2 / r_1\right)} - \frac{1}{\ln\left(r_2 / r_1\right)} \cdot \frac{S^2}{\left(r_2 - r_1\right)^2} \right]. \tag{8}$$

These formulas are used for further analysis.

The sensitivity of the vibration isolator with quasi-zero hardness to changes in geometric parameters

The design of vibration isolators with quasi-zero hardness and the study of the dynamics of a group of vibration isolators require information about sensitivity to the deviation of their parameters.

Let us consider a situation in which one of the parameters of the isolator differs sharply from its calculated value. We determine the change in workload and stiffness when changing geometric parameters. Based on the analysis of formulas (1)–(8), the sensitivity of dimensionless parameters is determined, which is summarised in Table 2. It shows the deviations of the workload with respect to various geometric parameters of the vibration isolator (sensitivity of the workload). The specified parameters are: wall thickness, height of the cone, inner radius of the isolator, outer radius of the isolator, thickness of the outer wall of the vibration insulator and height of the outer wall of the vibration insulator. Calculations are made in dimensionless form. The following dimensionless parameters were used:

- dimensionless workload $\overline{F} = \frac{F}{Fr^2}$;
- dimensionless wall thickness $\overline{t} = \frac{t}{t}$;
- dimensionless inner radius $\overline{r} = \frac{r_1^{2}}{r_2}$;
 dimensionless height of the cone $\overline{S} = \frac{S}{r}$;

- dimensionless thickness of the outer wall $\overline{t_s} = \frac{t_s}{s}$;
- dimensionless height of the outer wall $\overline{h}_s = \frac{h_s}{r_2}$;
- dimensionless stiffness $\overline{k} = \frac{k}{F/S}$.

Table 2. Sensitivity of the workload.

Таблица 2. Чувствительность рабочей нагрузки.

Dimensionless	Deviation of dimensionless value										
deviation	Wall thickness	Cone height S	Inner radius r_1	Thickness of the outer wall t_s	Height of the outer wall h_s	Outer radius r_2					
-0.10	-0.1840	-0.1000	-0.3591	-0.0372	-0.1068	1.5361					
-0.09	-0.1662	-0.0900	-0.3316	-0.0333	-0.0963	1.2814					
-0.08	-0.1484	-0.0800	-0.3026	-0.0295	-0.0857	1.0591					
-0.07	-0.1304	-0.0700	-0.720	-0.0258	-0.0751	0.8643					
-0.06	-0.1122	-0.0600	-0.2395	-0.0220	-0.0644	0.6928					
-0.05	-0.0939	-0.0500	-0.2052	-0.0183	-0.0538	0.5414					
-0.04	-0.0755	-0.0400	-0.1689	-0.0146	-0.0431	0.4071					
-0.03	-0.0569	-0.0300	-0.1304	-0.0109	-0.0323	0.2876					
-0.02	-0.0381	-0.0200	-0.0895	-0.0072	-0.0216	0.1810					
0.01	-0.0191	-0.0100	-0.0461	-0.0036	-0.0108	0.0856					
0.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000					
0.01	0.0193	0.0100	0.0491	0.0036	0.0108	-0.0771					
0.02	0.0388	0.0200	0.1013	0.0071	0.0216	-0.1466					
0.03	0.0584	0.0300	0.1571	0.0107	0.0324	-0.2095					
0.04	0.0783	0.0400	0.2166	0.0142	0.0432	-0.2665					
0.05	0.0983	0.0500	0.2801	0.0177	0.0540	-0.3183					
0.06	0.1186	0.0600	0.3481	0.0212	0.0647	-0.3654					
0.07	0.1390	0.0700	0.4210	0.0246	0.0755	-0.4085					
0.08	0.1597	0.0800	0.4991	0.0280	0.0862	-0.4478					
0.09	0.1805	0.0900	0.5830	0.0315	0.0969	-0.4838					
0.10	0.2016	0.1000	0.6732	0.0348	0.1076	-0.5168					
Sensitivity	1.9210	1.0000	4.7600	0.3600	1.0790	-8.1350					

The sensitivity of hardness at the operating point (i.e. the minimum hardness of the system) is presented in Table 3 (similarly, the change in hardness when changing one of the geometric parameters of the vibration isolator). The hardness sensitivity is calculated relative to the static stiffness, i.e. with respect to the value equal to the value of the workload divided by the working compression of the vibration isolator (i.e. *F/S*).

Table 3. Stiffness sensitivity at the working point. Таблица 3. Чувствительность жесткости в рабочей точке.

Dimensionless			Dev	riation of dimensionless value		
deviation	Wall thickness	Cone height	Inner radius	Thickness of the outer wall	Height of the outer wall	Outer radius
	t	S	r_1	t_s	h_s	r_2
-0.10	-0.1029	0.0266	0.0077	-0.0054	-0.0167	-0.0055
-0.09	-0.0914	0.0241	0.0070	-0.0048	-0.0149	-0.0047
-0.08	-0.0803	0.0215	0.0063	-0.0043	-0.0131	-0.0039
-0.07	-0.0694	0.0189	0.0055	-0.0037	-0.0114	-0.0033
-0.06	-0.0588	0.0163	0.0048	-0.0031	-0.0096	-0.0027
-0.05	-0.0485	0.0137	0.0040	-0.0026	-0.0080	-0.0021
-0.04	-0.0384	0.0110	0.0032	-0.0021	-0.0063	-0.0016
-0.03	-0.0285	0.0083	0.0024	-0.0015	-0.0047	-0.0012
-0.02	-0.0188	0.0055	0.0016	-0.0010	-0.0031	-0.0007
-0.01	-0.0093	0.0028	0.0008	-0.0005	-0.0015	-0.0004
0.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.01	0.0091	-0.0028	-0.0008	0.0005	0.0015	0.0003
0.02	0.0181	-0.0057	-0.0017	0.0010	0.0030	0.0006
0.03	0.0269	-0.0085	-0.0026	0.0015	0.0044	0.0009
0.04	0.0355	-0.0114	-0.0035	0.0020	0.0058	0.0011
0.05	0.0440	-0.0143	-0.0044	0.0024	0.0072	0.0013
0.06	0.0524	-0.0173	-0.0053	0.0029	0.0085	0.0015
0.07	0.0606	-0.0203	-0.0063	0.0034	0.0098	0.0017
0.08	0.0687	-0.0233	-0.0072	0.0038	0.0111	0.0019
0.09	0.0767	-0.0263	-0.0082	0.0043	0.0124	0.0020
0.10	0.0845	-0.0294	-0.0092	0.0047	0.0136	0.0021
Sensitivity	0.9210	-0.2800	-0.0840	0.0500	0.1510	0.0340

The sensitivity of the workload and stiffness at the operating point is shown in Fig. 3, 4.

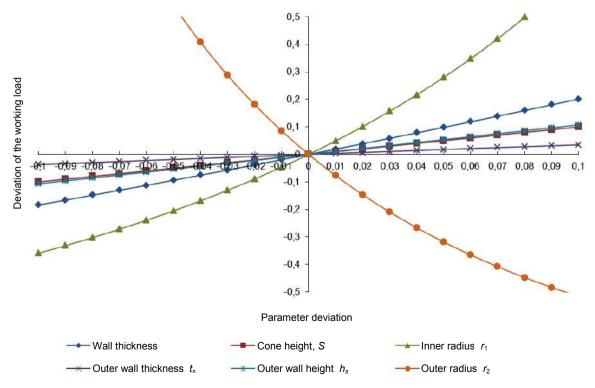


Figure 3. Sensitivity of the workload. Рисунок 3. Чувствительность рабочей нагрузки.

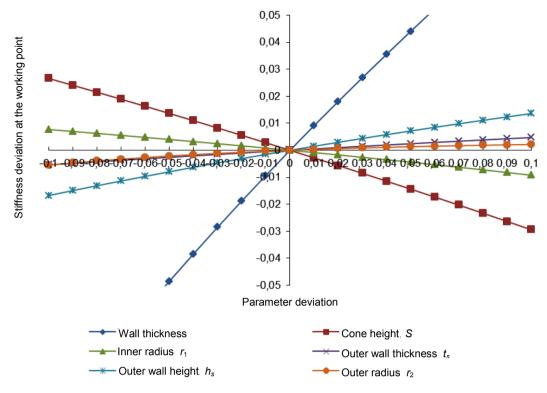


Figure 4. Stiffness sensitivity at the working point. Рисунок 4. Чувствительность жесткости в рабочей точке.

Table 4. Deviations for a group of vibration isolators. Таблица 4. Отклонения для группы виброизоляторов.

Standard deviation of dimensionless parameters	Deviation of average dimensionless workload	Standard deviation of dimensionless workload	Deviation of the average dimensionless stiffness under workload	Standard deviation of dimensionless stiffness under workload
0.000	0.00000	0.0000	0.0000	0.0000
0.005	0.00057	0.0267	0.0000	0.0127
0.010	0.00114	0.0534	-0.0006	0.0258
0.015	0.00256	0.0802	-0.0006	0.0383
0.020	0.00603	0.1099	-0.0014	0.0513
0.025	0.00962	0.1365	-0.0028	0.0643
0.030	0.01322	0.1650	-0.0030	0.0789
0.035	0.01935	0.1925	-0.0067	0.0934
0.040	0.02491	0.2265	-0.0072	0.1090
0.045	0.03079	0.2553	-0.0064	0.1217
0.050	0.04026	0.2884	-0.0077	0.1390
0.055	0.04811	0.3214	-0.0123	0.1571
0.060	0.06269	0.3628	-0.0138	0.1745
0.065	0.07894	0.4122	-0.0196	0.1927
0.070	0.08751	0.4538	-0.0200	0.2200
0.075	0.09356	0.4920	-0.0229	0.2367
0.080	0.10555	0.5215	-0.0265	0.2636
0.085	0.12513	0.6143	-0.0339	0.2971
0.090	0.13879	0.6486	-0.0334	0.3126
0.095	0.16731	0.7328	-0.0479	0.3507
0.100	0.18932	0.7776	-0.0462	0.4064

As can be seen from Table 2 and Fig. 3, the value of the workload is very sensitive to the internal and external radii of the vibration isolator. It is also sensitive to wall thickness and cone height. Consequently, these parameters should be given special attention in the production of vibration isolators.

In accordance with Table 3 and Fig. 4, one can see that stiffness at the working point strongly depends on the wall thickness and is inversely related to it. It should be noted that if the wall thickness is less than the calculated one, then the stiffness can become negative. This means that a "snap buckling" will occur, i.e. stability loss, which is unacceptable for the vibration isolator. Therefore, the wall thickness must be carefully controlled.

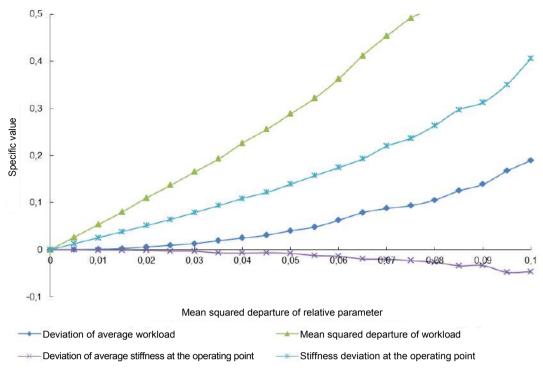


Figure 5. Stiffness sensitivity at the working point. Рисунок 5. Чувствительность жесткости в рабочей точке.

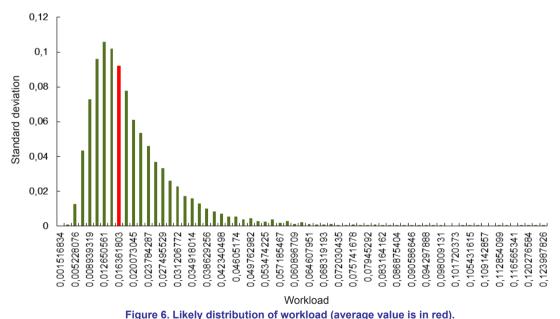


Figure 6. Likely distribution of workload (average value is in red). Рисунок 6. Вероятное распределение рабочей нагрузки (среднее значение дано красным цветом).

The joint work of a group of plate-type vibration isolators with quasi-zero stiffness

It follows from Fig. 4 that the sensitivity of vibration isolators with quasi-zero stiffness is not symmetrical with respect to nominal values. Indeed, since each vibration isolator has some deviation from the nominal parameters, it is necessary to check the behaviour of the vibration isolator group with quasi-zero stiffness.

For this purpose, the following calculations were made. It is assumed that the parameters of the vibration isolator (wall thickness, height of the cone, inner radius, thickness of the outer wall, height of the outer wall of the vibration isolator) may deviate somewhat. The deviation is taken in accordance with the normal distribution (Gaussian distribution) with a standard deviation σ .

A number of numerical experiments were carried out. During one experiment, 10 000 isolators with a standard deviation σ were calculated. The results are presented in Table 4.

The results from Table 4 are graphically illustrated in Fig. 5.

The analysis of Fig. 6 shows that the average workload (or the total workload of an isolator group) increases with an increase in the standard deviation of the parameters. Therefore, it is necessary to develop isolators for a lower workload. Moreover, as the number of vibration isolators increases, the spread of geometric parameters increases, and the standard deviation increases. Therefore, the dynamics of the vibration isolator group do not coincide with the behaviour of a single vibration isolator.

As for stiffness, its value decreases. Stiffness less than zero is unacceptable for isolators, as it is possible to observe a loss of stability. It leads to unacceptable system behaviour, increased vibration, and reduced durability.

To avoid the loss of stability of all systems, the stiffness of all vibration isolators should be slightly increased. For example, for the standard deviation of dimensionless parameters $\sigma = 0.1$, stiffness decreases by 4.6% (Table 4). Thus, to restore the stiffness value, the height of the cone should be reduced by 2.6% (according to Table 3).

Conclusion

Analytical studies prove the fact that vibration isolators with quasi-zero stiffness are very sensitive objects. Basic properties, such as workload and stiffness under workload, largely depend on key parameters. In plate-type isolators, there is a very strong dependence of the working load on the external and internal radii, the height of the cone and the wall thickness. This proves that vibration isolators with quasi-zero stiffness require careful attention and high precision in manufacturing.

The dynamics of a group of vibration isolators was analysed. Due to the deviation of different parameters and the nonlinearity of the power characteristics, the behaviour of the group does not coincide with the average behaviour of one vibration isolator. It turns out that for a group of isolators there is a slight increase in workload. But another problem is more important. Deviations of parameters lead to a decrease in stiffness, which can lead to loss of stability and instability of equipment Therefore, such deviations should be avoided. To this end, the reduction in stiffness due to a decrease in the height of the cone should be compensated.

Thus, the effectiveness of vibration isolators with quasi-zero stiffness can be increased through careful analysis and design.

Acknowledgements

The material of this paper was prepared with the support of the grant from the Ministry of Education and Science of the Russian Federation MK-2965.2018.8.

REFERENCES

- 1. Hassan R., McManus K. 2002, Perception of low frequency vibrations by heavy vehicle drivers. Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control, vol. 21, issue 2, pp. 65-76. https://doi.org/10.1260/026309202761019516
- 2. Takahashi Y., Harada N. 2007, A consideration of an evaluation index for high-level low-frequency noise by taking into account the effect of human body vibration. Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control, vol. 26, issue 1, pp. 15-27. https://doi. org/10.1260/026309207781487501
- 3. Takahashi Y. 2006, A consideration of the relationship between subjective unpleasantness and body surface vibrations induced by high-level, complex low frequency noise. Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control, vol. 25, issue 3, pp. 163-174. http://dx.doi. org/10.1260/026309206779800443
- 4. Berardi U., lannace G. 2017, Additive manufacturing for minimizing vibration damages in the water-stop tray of washing machines. Journal of low frequency noise, vibration and active control, vol. 36, issue 2, pp. 193-199. https://doi.org/10.1177/0263092317712017
- 5. Alabuzhev P. A., Gritchin L., Kim L., Migirenko G., Chon V., Stepanov P. 1989, Vibration Protecting and Measuring Systems with Quasi-Zero Stiffness. N. Y.: Hemisphere Publishing, 100 p.
- 6. Carrella A. 2008, Passive vibration isolators with high-static-low-dynamic-stiffness. Doctoral Thesis. Southampton: University of Southampton, UK, 226 p. URL: https://eprints.soton.ac.uk/51276
- 7. Carrella A., Friswell M. I. 2008, A passive vibration isolator incorporating a composite bistable plate. Proceedings of 6th European Nonlinear Dynamics Conference (ENOC-2008). 30 June–4 July. Saint Petersburg. URL: http://lib.physcon.ru/file?id=d343bb8a5a70
 8. Carrella A., Brennan M., Waters T. P. 2007, Static analysis for a passive vibration isolator with quasi-zero stiffness characteristic. *Journal of*
- Sound and Vibration, vol. 301(3-5), pp. 678-689. https://doi.org/10.1016/j.jsv.2006.10.011
- 9. Carrella A., Brennan M., Waters T. P. 2007, Optimization of a quasi-zero-stiffness isolator. Journal of Mechanical Science and Technology, vol. 21, pp. 946-949. URL: https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/BF03027074.pdf
- 10. Sun X., Xu J., Jing X., Cheng L. 2014, Beneficial performance of a quasi-zero-stiffness vibration isolator with time-delayed active control. International Journal of Mechanical Sciences, vol. 82, pp. 32-40. http://dx.doi.org/10.1016%2Fj.ijmecsci.2014.03.002
- 11. Le T. D., Ahn K. K. 2012, Fuzzy sliding mode controller of a pneumatic active isolating system using negative stiffness structure. Journal of Mechanical Science and Technology, vol. 26(12), pp. 3873–3884. https://doi.org/10.1007/s12206-012-0890-9
- 12. Holtz M. W., Van Niekerk J. L. 2010, Modelling and design of a novel air-spring for a suspension seat. Journal of Sound and Vibration, vol. 329(21), pp. 4354-4366. https://doi.org/10.1016/j.jsv.2010.04.017
- 13. Ponomaryov Yu. K., Belousov A. I. 2013, Concept development of combined rotors support of turbomachines rotors combined support with elastically-damping elements of hydrodynamic and cable types. Pumps, Turbines, Systems, vol. 2(7), pp. 46-53. (In Russ.). URL: http://jurnal-nts. ru/uploads/journal/21_file.pdf
- 14. Ponomarev Yu. K., Posohov P. V. 2014, Researching opportunities of characteristics improvement of hummock vibroinsulators with ring elements. New materials and technologies in mechanical engineering, vol. 19, pp. 100-106.
- 15. Tapia-Gonzales P. E., Ledezma-Ramirez D. F. 2017, Experimental characterization of dry friction isolators for shock and vibration. Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control, vol. 36(1), pp. 83-95. https://doi.org/10.1177/0263092317693509
- 16. Le T. D., Ahn K. K. 2011, A vibration isolation system in low frequency excitation region using negative stiffness structure for vehicle seat. Journal of Sound and Vibration, vol. 330(26), pp. 6311-6335. https://doi.org/10.1016/j.jsv.2011.07.039
- 17. Maciejewski I., Meyer L., Krzyzynski T. 2009, Modelling and multi-criteria optimization of passive seat suspension vibro-isolating properties. Journal of Sound and Vibration, vol. 324(3–5), pp. 520–538. https://doi.org/10.1016/j.jsv.2009.02.021
- 18. Ishida S., Suzuki K., Shimosaka H. 2017, Design and Experimental Analysis of Origami-Inspired Vibration Isolator With Quasi-Zero-Stiffness Characteristic. Journal of Vibration and Acoustics, vol. 139(5). 051004. https://doi.org/10.1115/1.4036465
- 19. Zhou J., Wang X., Xu D., Bishop S. 2015, Nonlinear dynamic characteristics of a quasi-zero stiffness vibration isolator with cam-roller-spring mechanisms. Journal of Sound and Vibration, vol. 346, June, pp. 53-69. https://doi.org/10.1016/j.jsv.2015.02.005
- 20. Choi S. B., Han Y. M. 2007, Vibration control of electrorheological seat suspension with human-body model using sliding mode control. Journal of Sound and Vibration, vol. 303, issues 1-2, pp. 391-404. https://doi.org/10.1016/j.jsv.2007.01.027
- 21. Choi S. B., Nam M. H., Lee B. K. 2000, Vibration control of a MR seat damper for commercial vehicles. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, vol. 11(12), pp. 936-944. https://doi.org/10.1106/AERG-3QKV-31V8-F250
- 22. Gan Z., Hillis A. J., Darling J. 2015, Adaptive control of an active seat for occupant vibration reduction. Journal of Sound and Vibration, vol. 349, pp. 39-55. https://doi.org/10.1016/j.jsv.2015.03.050
- 23. Kawana M., Shimogo T. 1998, Active suspension of truck seat. Shock and Vibration, vol. 5(1), pp. 35-41. http://dx.doi.org/10.1155/1998/579025 24. Robertson W., Wood R., Cazzolato B., Zander A. 2006, Zero-stiffness magnetic springs for active vibration isolation. Proceedings of the 6th International Symposium on Active Noise and Vibration Control (9–12 July): CD-ROM. Cairns, Australia, URL: http://hdl.handle.net/2440/35429
- 25. Ning D., Sun S., Zhang J., Du H., Li W., Wang X. 2016, An active seat suspension design for vibration control of heavy-duty vehicles. Journal of low frequency noise, vibration and active control, vol. 35(4), pp. 264-278. https://doi.org/10.1177/0263092316676389
- 26. Zheng Y., Zhang X., Luo Y., Yan B., Ma C. 2016, Design and experiment of a high-static-low-dynamic stiffness isolator using a negative stiffness magnetic spring. Journal of Sound and Vibration, vol. 360, pp. 31-52. https://doi.org/10.1016/j.jsv.2015.09.019

27. Gohari M., Tahmasebi M. 2015, Active Off-Road Seat Suspension System Using Intelligent Active Force Control. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, vol. 34(4), pp. 475–489. https://doi.org/10.1260%2F0263-0923.34.4.475
28. Valeev A. R., Zotov A. N., Tikhonov A. Yu. 2010, Vibrated insulating suspension with quasi-zero-stiffness. *Problems of gathering, treatment and transportation of oil and oil products*, no. 3, pp. 68–77. (*In Russ.*). URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=15203188
29. Valeev A. R., Zotov A. N., Kharisov Sh. A. 2015, Designing of compact low frequency vibration isolator with quasi-zero stiffness. *Journal of low frequency noise, vibration and active control*, vol. 34(4), pp. 459–474. https://doi.org/10.1260%2F0263-0923.34.4.459

The article was received on April 10, 2018

УДК 62-752

https://doi.org/10.21440/2307-2091-2018-4-74-83

Математическое моделирование совместной работы группы виброизоляторов с квазинулевой жесткостью

Анвар Рашитович ВАЛЕЕВ, Алексей Николаевич ЗОТОВ, Марат Мидхатович ГАЛИУЛЛИН, Тимур Айратович ЯНБАРИСОВ

Уфимский государственный нефтяной технический университет, Россия, Республика Башкортостан, Уфа

Актуальность работы обусловлена необходимостью разработки новых средств высокоэффективной вибрационной защиты. Одними из таких средств являются виброизоляторы с квазинулевой жесткостью. Они являются достаточно чувствительными элементами, поэтому проблема проектирования и эксплуатации виброизоляторов с квазинулевой жесткостью является актуальной. На данный момент не проведены еще комплексные исследования по их работе в группе.

Шелью работы является исследование чувствительности виброизоляторов с квазинулевой жесткостью к погрешностям геометрических параметров при их изготовлении.

Методология исследования. Данная работа является продолжением экспериментальных и опытных исследований универсальных виброизоляторов с квазинулевой жесткостью тарельчатого типа. Для исследования применялось аналитическое исследование и компьютерный многократный эксперимент со случайными входными данными.

Результаты. Аналитические исследования показывают, что виброизоляторы с квазинулевой жесткостью являются очень чувствительными объектами. Основные свойства, такие как рабочая нагрузка и жесткость при рабочей нагрузке, в значительной степени зависят от ключевых параметров. У виброизоляторов тарельчатого типа наблюдается очень сильная зависимость рабочей нагрузки от внешних и внутренних радиусов, высоты конуса и толшины стенки. Была проанализирована динамика группы виброизоляторов. Из-за отклонения разных параметров и нелинейности силовых характеристик поведение группы не совпадает со средним поведением одного виброизолятора. Установлено, что для группы изоляторов наблюдается небольшое увеличение рабочей нагрузки. Также отклонения параметров приводят к снижению жесткости.

Выводы. Установленная высокая чувствительность виброизоляторов с квазинулевой жесткостью доказывает, что они требуют тщательного внимания и высокой точности при изготовлении. Полученные отклонения поведения группы виброизоляторов от поведения одиночного виброизолятора указывают на необходимость ввода соответствующих поправок при их проектировании, в противном случае это может привести к потере устойчивости и нестабильности положения оборудования, чего следует избегать.

Ключевые слова: вибрация, виброизолятор, квазинулевая жесткость, математическое моделирование, нелинейные колебания, чувствительность.

УДК 622.235

Оценка влияния взрывных работ на устойчивость спаренных тоннелей

Туан Минь ЧАН¹, Сюань Нам БУЙ¹.˙, Куанг Хиеу ЧАН¹, Куанг Хюи НГУЕН².¨, Владимир Иванович ГОЛИК³.˙¨

Актуальность исследования объясняется необходимостью строительства большого объема подземных транспортных магистралей в условиях сложноструктурных породных массивов Вьетнама. Решение затронутой проблемы может служить основанием для оптимизации процессов строительства подземных объектов многоцелевого назначения.

Шелью исследования является установление закономерностей между техногенными напряжениями вследствие взрывных работ в новом тоннеле и сохранностью конструкций и горных пород в существующем тоннеле для оптимизации параметров крепей тоннелей.

Сверхзалачей исследования является получение количественных параметров напряженности массива путем моделирования условий тоннеля в заданных условиях методом конечных элементов с учетом того, что давление взрыва при расширении вспомогательного тоннеля до проектного сечения концентрируется на контуре проектного тоннеля.

Предметом исследования является транспортный тоннель Хайван на дороге Север-Юг Вьетнама.

Результаты и их обсуждение. Приведенѕ методика и результаты численного моделирования по программе Phase 2 условий строительства основного и вспомогательного тоннелей. Получены параметры распределения напряжений и деформаций в окрестностях вспомогательного и капитального тоннелей при изменении взрывного давления. Получены количественные значения безопасного для крепи взрывного давления в элементах системы обоих тоннелей. Рекомендованы безопасные по фактору устойчивости крепи тоннелей параметры взрывных работ.

ВЫВОДЫ. Генерируемые взрывными работами техногенные напряжения во вмещающем строительные объекты породном массиве не разрушают крепь тоннеля, если не превышают установленной для данных условий величины, и регулируются технологически путем выбора рациональных параметров взрывных работ на любой стадии строительства.

Ключевые слова: взрывные работы, взрывная волна, давление, крепь, тоннель, напряжения, устойчивость.

Ведение
Проходка нового тоннеля вблизи существующего или расширение транспортного тоннеля на дороге Север-Юг Вьетнама осуществляется буровзрывным способом, который широко используются во Вьетнаме [1–3]. В будущем тоннели Хайван, Деока, Кумонг и другие будут расширяться таким же способом.

Состояние и устойчивость горных пород вокруг транспортного тоннеля, а также оценка влияния взрывного воздействия от проходки нового тоннеля на существующий тоннель были оценены в работах вьетнамских ученых [4–9] и ученых других стран мира, в том числе и России [10–15].

Целью исследования является установление закономерностей влияния взрывных работ в новом тоннеле на конструкции и окружающий горный массив в существующем тоннеле, что служит основой оптимизации параметров крепей.

Поставленная цель достигается посредством моделирования напряженно-деформированного состояния горного массива вокруг вспомогательного и капитального тоннелей при изменении эквивалентного взрывного давления.

Исследования выполнены для условий тоннеля Хайван между Тхыа Тхиен Хюэ и Данангом (Вьетнам), пройденного в 2005 г. с общей длиной выработок 6280 м, в том числе два параллельных тоннеля, четыре полосы для автомашин и вентиляционные стволы. Проблема этого тоннеля характерна и для других тоннелей и подземных объектов Вьетнама.

Результаты и их обсуждение

Главный тоннель имеет ширину 13 м. Вспомогательный тоннель находится на расстоянии 30 м от главного и имеет площадь 15,5 м^2 (рис. 1).

Для достижения цели исследования использовано численное моделирование по программе Phase 2. Длина тоннеля 6,3 км, поэтому моделировали условия части тоннеля, приняв, что породы имеют неизменяющиеся свойства. Вспомогательный тоннель имеет ширину 5,3 м и высоту 4,5 м. Существующий тоннель закреплен железобетонной крепью с толщиной 35 см, арматурой диаметром 22 мм и расстоянием между элементами арматуры 20 см. Результаты численного моделирования приведены на рис. 2.

https://orcid.org/0000-0001-5953-4902

** Tuanminhhumg@yahoo.com

™⊠ v.i.golik@mail.ru

https://orcid.org/0000-0002-1181-8452

¹Ханойский университет горного дела и геологии, Вьетнам, Ханой

²Институт транспортных технологий, Вьетнам, Ханой

³Северо-Кавказский государственный технологический университет, Россия, Владикавказ

buixuannam@humg.edu.vn



Рисунок 1. Модель тоннеля Хайван во Вьетнаме.

Figure 1. The model of the tunnel Hai Van in Vietnam.

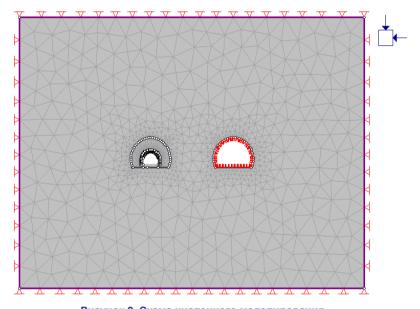


Рисунок 2. Схема численного моделирования. Figure 2. The scheme of numerical modeling.

Размеры модели: ширина 125 м, высота – 90 м. Эквивалентное взрывное давление для моделирования может определяться по формуле:

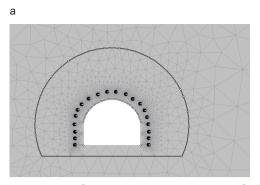
 $p = 0.00337 \rho v^2$,

где p – давление взрывной волны, МПа; ρ – плотность заряжания BB; v – скорость взрывной волны, м/с.

Предполагаем, что давление взрыва при расширении вспомогательного тоннеля до проектного сечения концентрируется на контуре проектного тоннеля (рис. 3–6).

Моделированием определены параметры взрывного давления на контуре вспомогательного тоннеля. Рассматривая совместно динамику сил в крепи и динамику взрывного давления при расширении вспомогательного тоннеля, определили величину взрывного давления, которое не разрушает конструкцию. Результаты расчета напряженно-деформированного состояния вокруг вспомогательного и капитального тоннелей при изменении эквивалентного взрывного давления показаны на рис. 7–9.

Закономерность динамики сил в существующем тоннеле иллюстрируется рис. 10–12.



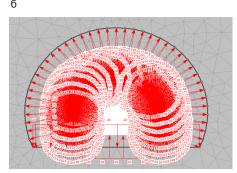


Рисунок 3. Моделирование буровзрывного давления в забое. а — шпуры в первой группе; б — взрывное давление в шпурах. Figure 3. Modeling of drilling-and-blasting bottomhole pressure. a — blastholes in the first group; б — blast pressure in the blastholes.

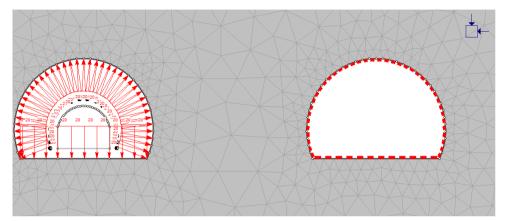


Рисунок 4. Результаты моделирования при взрывном давлении 20 МПа. Figure 4. The results of modelling with blast pressure of 20 MPa.

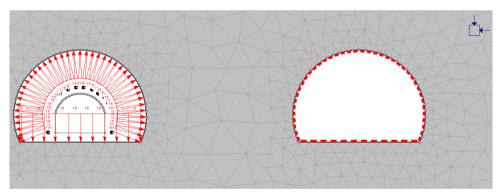


Рисунок 5. Результаты моделирования при взрывном давлении 15 МПа. Figure 5. The results of modelling with blast pressure of 15 MPa.

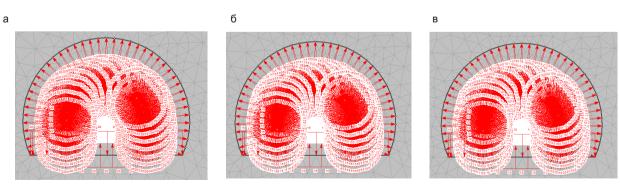


Рисунок 6. Динамика взрывного давления при проходке вспомогательного тоннеля. а - взрывное давление 20 МПа; б - 15 МПа; в - 10 МПа.

Figure 6. The dynamics of the blast pressure while tunneling. a – blast pressure 20 MPa; δ – 15 MPa; B – 10 MPa.

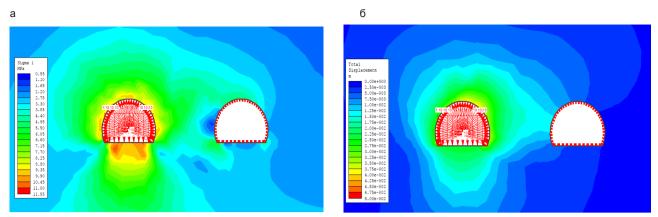


Рисунок 7. Распределение напряжений и смещений при взрывном давлении 10 МПа. а – распределение вертикальных напряжений на контуре тоннелей; б – распределение смещений на контуре тоннелей.

Figure 7. Distribution of stresses and displacements at an explosive pressure of 10 MPa. a - distribution of vertical stresses on the contour of the tunnels; 6 - distribution of displacements on the contour of the tunnels.

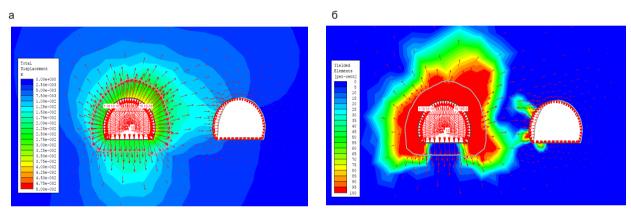


Рисунок 8. Вектор смещения горных пород и зоны неупругих деформаций на контуре тоннелей при взрывном давлении 10 МПа. а — распределение векторов смещений горных пород вокруг тоннелей; б — зоны неупругих деформаций вокруг двух тоннелей. Figure 8. Displacement vector of rocks and plastic range of stress on the contour of tunnels with an explosive pressure of 10 MPa. a—distribution of rock displacement vectors around tunnels; б — plastic range of stress around two tunnels.

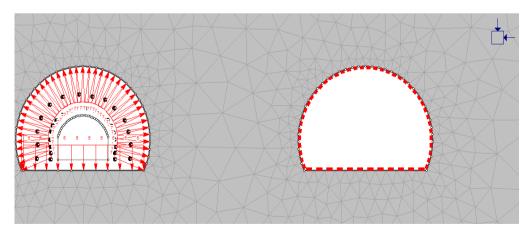


Рисунок 9. Распределение напряжений и смещений при взрывном давлении 7 МПа. Figure 9. Distribution of stresses and displacements at an explosive pressure of 7 MPa.

Результаты моделирования (рис. 13-15) свидетельствуют о том, что взрывное давление имеет оптимальное значение, пока значения внутренних сил (M, H, Q) в крепи существующего тоннеля равны значениям во вспомогательном тоннеле. При значении взрывного давления до 7 МПа силы в существующем тоннеле не изменяются.

Результаты моделирования показывают, что взрывные работы во вспомогательном тоннеле капитального тоннеля Хайван не оказывают опасного влияния на устойчивость конструкции крепи в существующем тоннеле (табл. 1–2).

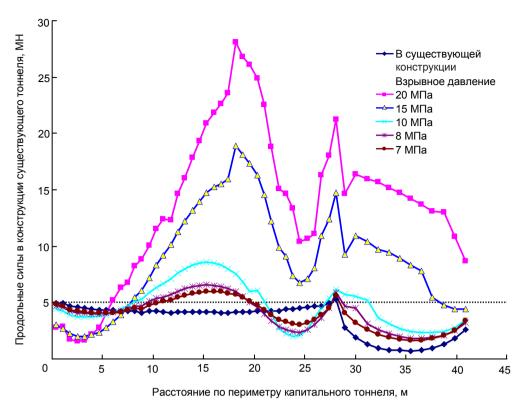


Рисунок 10. Динамика продольной силы в крепи существующего тоннеля до взрыва и после взрыва во вспомогательном тоннеле. Figure 10. The dynamics of axial force in the poling boards of the existing tunnel before the explosion and after the explosion in the auxiliary tunnel.

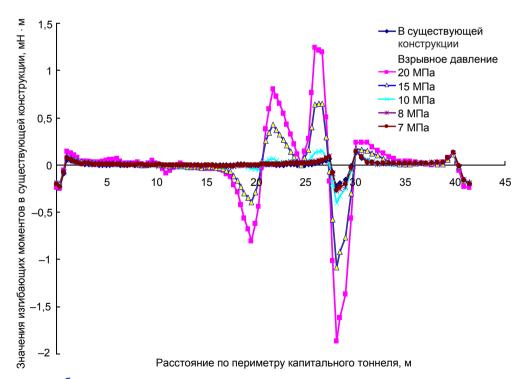
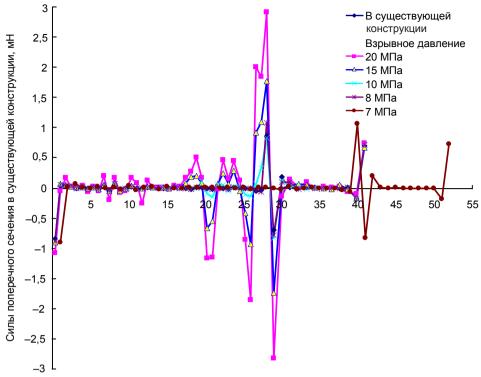


Рисунок 11. Динамика изгибающих моментов в крепи существующего тоннеля до взрыва и после взрыва во вспомогательном тоннеле.

Figure 11. The dynamics of bending moments in the poling boards of the existing tunnel before the explosion and after the explosion in the auxiliary tunnel.



Расстояние по периметру капитального тоннеля, м

Рисунок 12. Динамика силы поперечного сечения в крепи существующего тоннеля до взрыва и после взрыва во вспомогательном тоннеле.

Figure 12. The dynamics of the cross-section force in the poling boards of the existing tunnel before the explosion and after the explosion in the auxiliary tunnel.

Таблица 1. Показатели расширения вспомогательного тоннеля Хайван при взрыве.

Table 1. Expansion numbers of the auxiliary tunnel Hai Van while explosion.

Показатель	Значение
Глубина шпуров $L_{_{\!\scriptscriptstyle K}}$, м	1,3
Расстояние между шпурами в ряду <i>W</i> , м	0,8
Удельный расход BB q , кг/м 3	0,8
Общий расход ВВ $Q_{\rm BB}$, кг	42,75
Количество шпуров N , шт.	98
Длина заряда в шпуре во врубах $L_{_{\mathrm{R}}}$, м	0,6
Длина заряда во врубах $L_{3,8}$, м	0,7
Длина заряда в контурной группе <i>L</i> ₂ , м	0,3
Длина заряда в контурной группе L_{p} , м	1,0

Таблица 2. Параметры заряжания шпуров в забое тоннеля.

Table 2. The parameters of hole charging at a face of the tunnel.

	Элек-		замед-		Общее	Глу- бина	Суммарная масса за- ряда ВВ, кг			Глу- бина	Плино	Угол наклона, град.	
Шпуры	Номер шпура	троде- тона- тор	ления времени, мс	Шпур	число шпу- ров	шпу- ров, м	На 1 шпур	Число шпуров	Всего	пере- бура, м	Длина, м	Верти- каль	Гори- зон- таль
Отбойный шпур 1	1–8	1	25	2	16	1,3	0,6	8	4,8	0,7	5,6	90	115
Отбойный шпур 2	9–16	5	125	2	16	1,3	0,6	8	4,8	0,7	5,6	105	105
Отбойный шпур 3	17–24	9	250	1,5	12	1,3	0,45	8	3,6	0,85	6,8	90	100
Отбойный шпур 4	25-34	11	350	1,5	15	1,3	0,45	10	4,5	0,85	8,5	90	95
Отбойный шпур 5	34-41	13	450	1	8	1,3	0,3	8	2,4	1	8	90	90
Отбойный шпур 6	42-51	15	600	1	11	1,3	0,3	11	3,3	1	11	90	90
Контурный шпур	52-66	17	800	1	16	1,3	0,3	16	4,8	1	16	90	92
Подошвенный шпур 1	67–75	20	1125	1	16	1,3	0,3	16	4,8	1	16	90	92
Подошвенный шпур 2	76-80	21	1225	2,5	15	1,3	0,75	6	4,5	0,55	3,3	90	92
Подошвенный шпур 2	81–98	30	4350	2,5	17,5	1,3	0,75	7	5,25	0,55	3,85	90	92
Итого	_	_	_	_	142,5	_		98	42,75	_	_	_	





Рисунок 13. Буровзрывные работы при расширении вспомогательного тоннеля. Figure 13. Blasting workings during the expansion of the auxiliary tunnel.

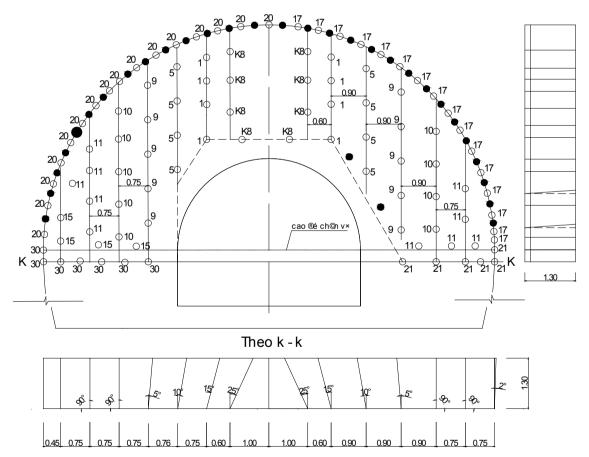


Рисунок 14. Схема расположения шпуров в забое вспомогательного тоннеля. Figure 14. The boring hole pattern at a face of the auxiliary tunnel.





Рисунок 15. Разрушение крепи существующего тоннеля после взрыва во вспомогательном тоннеле. Figure 15. Destruction of the poling boards of the existing tunnel after the explosion in the auxiliary tunnel.

Выводы

При величине взрывного давления до 7 МПа природно-техногенные напряжения в массиве не разрушают крепь тоннеля.

Для уменьшения взрывного давления и повышения устойчивости конструкций крепи и устойчивости пород вокруг тоннелей рекомендуется использование электродетонаторов с сериями замедлений, ориентировка направления ударной волны противоположна направлению вблизи расположенного тоннеля.

Повышение эффективности работы взрыва достигается применением дифференциальной схемы с неэлектрическими средствами взрывания и рационализация схемы вруба – посредством инициирования взрывной сети в направлении минимизации негативного влияния взрывных волн.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Võ Trọng Hùng. Ảnh hưởng của công tác khoan nổ mìn đến sự hình thành vùng phá hủy xung quanh công trình ngầm [Воздействие бурения и взрывных работ на формирование участков сноса вокруг подземных сооружений] // Тạp chí công nghiệp mỏ [Mining Industry Journal]. 2012. Số 1, tr. 5–9.
- 2. Võ Trọng Hùng. Nghiên cứu sự tác động của sóng nổ mìn đến kết cấu chống giữ công trình ngầm [Исследование влияния взрывных волн на подземные сооружения] // Тạp chí Công nghiệp Mỏ [Mining Industry Journal]. 2010. Số 6, tr. 1–5.
- 3. Võ Trọng Hùng, Lễ Đình Tân, Nguyễn Tiến Khiêm. Nghiên cửu động lực học mỗi trường đất đá và kết cấu đường hầm dưới tác dụng sóng nổ [Изучение динамики окружающей среды горных пород и почв и структуры туннеля под взрывной волной] // Тạp chí Địa kỹ thuật [Vietnamese Geotechnical Journal]. 1999. Số 1.
- 4. Lê Đình Tân. Tính toán động lực học công trình ngầm chịu tác dụng của sóng nổ [Расчет динамики подземных сооружений, подверженных воздействию волн взрыва]: тезисы дис. Hà Nội, Học viện KTQS, 2000.
- 5. Quy phạm an toàn về bảo quản, sử dụng, vận chuyển và tiêu hủy vật liệu nổ công nghiệp [Правила безопасности при сохранении, использовании, транспортировке и уничтожении промышленных взрывчатых материалов]: QCVN 02:2008/BCT [Технический регламент]. 6. Nguyễn Xuân Mãn và, nnk. Xác định bán kính phá hủy khi nổ một lượng thuốc nổ đơn độc trong khối đá [Определение радиуса разрушения при взрыве одного взрывчатого вещества в скале]. Tuyển tập báo cáo Hội nghị Khoa học lần thứ 19, Đại học Mỏ-Địa chất [Материалы 19-й науч. конф.]. Hanoi, Hanoi University of Mining and Geology, 2010. P. 21–25.
- 7. Nguyễn Hải Hưng và, nnk. Ảnh hưởng của thời gian tác dụng nổ đến kết cấu công trình ngầm quân sự [Влияние продолжительности действия взрыва подземных сооружений на военную инфраструктуру]. Tuyển tập báo cáo Hội nghị Khoa học lần thứ21, Đại học Mỏ-Địa chất [Материалы 19-й науч. конф.]. Hanoi, Hanoi University of Mining and Geology, 2014.
- 8. Đặng Văn Kiên. Khẩo sát chấn động nổ mìn khi đào hằm bằng phương pháp khoan nổ mìn ở khu vực thành phố bằng mô hình 2D [Исследование сотрясений при проходке взрывных работ по бурению и метод взрывных работ в городских районах в 2D модели] // Тạp chí Công nghiệp mỏ [Mining Industry Journal]. 2014. Số 6, tr. 7–12.
- 9. Đàm Trọng Thắng, Bùi Xuân Nam, Trần Quang Hiếu. Nổ mìn trong ngành mỏ và công trình [Разведка шахт в горнодобывающей промышленности и строительстве]. Hà Nội, 2015. 454 tr.
- 10. Stolárik M. Modeling of vibration effect within small distances // Acta Geodynamica et Geomaterialia. 2008. Vol. 5, № 2(150). P. 137–146. URL: https://www.ceramics-silikaty.cz/materialy/acta content/2008 02/5 Stolarik.pdf
- 11. Volden J. A. B. Engineering geological evaluation of the applicability of Drill & Split in tunnels at the Follo line project: Master's Thesis. Trondheim, 2015. 139 p.
- 12. Jinxing Lai, Haobo Fan, Jianxun Chen, Junling Qiu, KeWang. Blasting Vibration Monitoring of Undercrossing Railway Tunnel Using Wireless Sensor Network // International Journal of Distributed Sensor Networks. 2015. Vol. 11, issue 6. https://doi.org/10.1155/2015/703980
- 13. Qingguo Liang, Jie Li, Dewu Li, Erfeng Ou. Effect of Blast-Induced Vibration from New Railway Tunnel on Existing Adjacent Railway Tunnel in Xinjiang, China // Rock mechanics and rock engineering. 2012. Vol. 46, issue 1. P. 19–39. https://doi.org/10.1007/s00603-012-0259-5
- 14. Голик В. И., Комащенко В. И., Качурин Н. М. К проблеме подземной разработки рудных месторождений Центрального федерального округа // Изв. ТулГУ. Науки о Земле. 2016. № 4. С. 127–139.
- 15. Голик В. И., Исмаилов Т. Т., Страданченко С. Г., Лукьянов В. Г. Охрана искусственных массивов от сейсмического воздействия при подземной добыче руд // Изв. ТПУ. Инжиниринг георесурсов. 2016. Т. 327, № 4. С. 6–15.

Статья поступила в редакцию 16 марта 2018 г.

https://doi.org/10.21440/2307-2091-2018-4-84-92

УДК 622.235

Evaluation of influence of blasting workings on the stability of double tunnels

Tuan Minh TRAN1, Xuan Nam BUI1 Quang Hieu TRAN1 Quang Huy NGUYEN^{2, **} Vladimir Ivanovich GOLIK^{3,***}

¹Hanoi University of Mining and Geology, Hanoi, Vietnam

²Institute of Transport Science and Technology, Hanoi, Vietnam

³North Caucasian Mining and Metallurgical Institute (State Technological University), Vladikavkaz, Russia

Relevance of the study is explained by the need to build a large amount of underground traffic arteries in the complex structural rock masses of Vietnam. The solution of the problem can serve as a basis for optimizing the processes of construction of underground multipurpose facilities.

Purpose of the study is to determine regularities between technological stresses due to blasting workings in a new tunnel and keeping of construction and rocks in the existing tunnel to optimize the parameters of the tunnel poling boards.

The most important task of the study is to obtain quantitative parameters of stress of the rock mass by simulating the conditions of a tunnel under specified conditions using the finite element method and taking into account that the explosion pressure during expansion of the auxiliary tunnel before the design section is fixed on the contour of the designed tunnel.

The subject of the research is the Hai Van transport tunnel in the North-South Vietnam road.

Results and discussion. The methodology and results of numerical modeling using the Phase 2 program for the conditions of construction of the main and auxiliary tunnels are given. The parameters of the distribution of stresses and strains in the vicinity of the auxiliary and main tunnels with varying explosive pressure are obtained. The quantitative values of safe explosive pressure for poling boards in the elements of the system of both tunnels were obtained. The safety parameters of blasting workings are recommended (according to the stability factor of poling boards).

Conclusions. Technogenic stresses generated by blasting workings in the rock mass that encloses building sites do not destroy the poling boards of a tunnel, if they do not exceed the value specified for these conditions; they are technologically regulated by choosing rational blasting parameters at any stage of construction.

Keywords: blasting workings, blast wave, pressure, poling board, tunnel, stress, stability.

REFERENCES

- 1. Võ Trọng Hùng. 2012, Ảnh hưởng của công tác khoan nổ mìn đến sự hình thành vùng phá hủy xung quanh công trình ngầm [Impact of drilling and blasting workings on the formation of removal sites around underground structures]. *Tạp chí công nghiệp mỏ* [Mining Industry Journal], số 1,
- tr. 5–9. (In Vietnamese).

 2. Võ Trọng Hùng. 2010, Nghiên cứu sự tác động của sóng nổ mìn đến kết cấu chống giữ công trình ngầm [Study of the effect of blast waves on underground structures]. Tạp chí Công nghiệp Mở [Mining Industry Journal], số 6, tr. 1–5. (In Vietnamese).

 3. Võ Trọng Hùng, Lê Đình Tân, Nguyễn Tiến Khiêm. 1999, Nghiên cứu động lực học mỗi trường đất đá và kết cấu đường hầm dưới tác dụng sóng nỗ [The study of the dynamics of the environment of rocks and soils and the structure of the tunnel under the blast wave]. Tạp chí Địa kỹ thuật [Vietnamese Geotechnical Journal], số 1. (In Vietnamese).

 4. Lê Đình Tân. 2000, Tính toán động lực học công trình ngầm chịu tác dụng của sóng nỗ [Calculation of the dynamics of underground structures exposed to explosion waves]. Luận án TSKT [PhD thesis]. Hà Nội, Học viện KTQS. (In Vietnamese).

 5. Quy phạm an toàn về bảo quản, sử dụng, vận chuyển và tiêu hủy vật liệu nổ công nghiệp [Safety rules for the preservation, use, transportation and destruction of industrial explosive materials]. QCVN 02:2008/BCT [Technical Reglament]. (In Vietnamese).

- and destruction or industrial explosive materials. QCVN 02:2008/BC1 [Technical Regiament]. (In Vietnamese).

 6. Nguyễn Xuân Mãn và, nnk. 2010, Xác định bán kính phá hủy khi nổ một lượng thuốc nổ đơn độc trong khối đá [Determination of the radius of destruction in the explosion of a single explosive substance in the rock]. Tuyển tập báo cáo Hội nghị Khoa học lần thứ 19, Đại học Mỏ-Địa chất [Proceedings of 19-th scientific conference]. Hanoi, Hanoi University of Mining and Geology, pp. 21–25. (In Vietnamese).

 7. Nguyễn Hải Hưng và, nnk. 2014, Ảnh hưởng của thời gian tác dụng nỗ đến kết cấu công trình ngầm quân sự [The impact of the duration of the effect of underground structures explosion on the military infrastructure]. Tuyển tập báo cáo Hội nghị Khoa học lần thứ21, Đại học Mỏ-Địa chất [Proceedings of 19-th scientific conference]. Hanoi, Hanoi University of Mining and Geology.(In Vietnamese).
- 8. Đặng Văn Kiên. 2014, Khảo sát chấn động nổ mìn khi đào hằm bằng phương pháp khoan nổ mìn ở khu vực thành phố bằng mô hình 2D [Investigation of shocks during drilling blasting workings and method of blasting in urban areas in a 2D model]. Tạp chí Công nghiệp mỏ[Mining Industry Journal], số 6, tr. 7-12. (In Vietnamese).
- 9. Đàm Trọng Thắng, Bùi Xuân Nam, Trần Quang Hiếu. 2014, Nổ mìn trong ngành mỏ và công trình [Mine site exploration in extraction industry and construction]. HàNội, 454 tr.(In Vietnamese).
- 10. Stolárik M. 2008, Modeling of vibration effect within small distances. Acta Geodynamica et Geomaterialia, vol. 5, no. 2(150), pp. 137–146. URL: https://www.ceramics-silikaty.cz/materialy/acta_content/2008_02/5_Stolarik.pdf
- 11. Volden J. A. B. 2015, Engineering geological evaluation of the applicability of Drill & Split in tunnels at the Follo line project. Master's Thesis. Trondheim, 139 p.
- 12. Jinxing Lai, Haobo Fan, Jianxun Chen, JunlingQiu, and KeWang. 2015, Blasting Vibration Monitoring of Undercrossing Railway Tunnel Using Wireless Sensor Network. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 11, issue 6. https://doi.org/10.1155/2015/703980
 13. Qingguo Liang, Jie Li, Dewu Li, Erfeng Ou. 2012, Effect of Blast-Induced Vibration from New Railway Tunnel on Existing Adjacent Railway
- Tunnel in Xinjiang, China. Rock mechanics and rock engineering, vol. 46, issue 1, pp. 19-39.https://doi.org/10.1007/s00603-012-0259-5
- 14. Golik. I., Konashchenko V. I., Kachurin N. M. 2016, To the problem of underground mining of ore deposits of the central federal district. Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta [Izvestiya Tula State University. Earth Sciences], no. 4, pp. 127–139. (In Russ.).
- 15. Golik V. I., Ismailov T. T., Stradanchenko S. G., Lukyanov V. G. 2016, Protection of artificial massifs from seismic impact during underground mining of ores. Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering], vol. 327, no. 4. pp. 6-15. (In Russ.).

The article was received on March 16, 2018

* buixuannam@humg.edu.vn

https://orcid.org/0000-0001-5953-4902

Tuanminhhumg@yahoo.com

*** v.i.golik@mail.ru

https://orcid.org/0000-0002-1181-8452

УДК 622.271.0025

Взаимодействие главных механизмов карьерного экскаватора при экскавации горных пород

Анатолий Павлович КОМИССАРОВ¹, Юлия Андреевна ЛАГУНОВА¹,*, Никита Сергеевич ПЛОТНИКОВ¹, Ольга Анатольевна ЛУКАШУК². ¨, Виль Ирхужеевич САИТОВ¹

¹Уральский государственный горный университет, Россия, Екатеринбург

Актуальность работы определяется темой исследования – изучение режимов работы и степени взаимодействия главных механизмов (подъемного и напорного) карьерного экскаватора в процессе экскавации горной массы. Развитие конструкций карьерных экскаваторов (мехлопат), представляющих собой уникальные технические объекты, характеризуется проявлением критического несоответствия между техническим совершенством конструкций и сложностью управления рабочим процессом копания. В технической литературе отсутствуют сведения о режимах совместной работы главных механизмов карьерных экскаваторов в процессе экскавации горной массы, разрабатываемые алгоритмы управления рабочим процессом основываются на абстрактных моделях (методах нечеткой логики, мультиагентного подхода и т. п.). В работе на основе имитационной модели процесса экскавации впервые выполнено алгоритмическое описание процесса и определены режимы работы главных механизмов, обеспечивающие перемещение ковша (вершины режущей кромки) по заданной траектории. Показано, что при совместной работе главных механизмов преобразование режимных параметров механизмов в энергосиловые параметры, реализуемые на ковше, происходит в зависимости от кинематических свойств двухкривошипно-рычажного механизма рабочего оборудования, соединяющего главные механизмы с ковшом. В результате вычислительного эксперимента определены диапазоны изменения скоростей и усилий подъема и напора при перемещении ковша в пределах рабочей зоны экскаватора.

Результаты и их применение. Разработанный метод определения режимных параметров главных механизмов позволит создать автоматизированную систему цифрового управления процессом экскавации, адаптированную к конкретным горнотехническим условиям эксплуатации и параметрам рабочего забоя, что в конечном счете обеспечит повышение эффективности функционирования карьерного экскаватора.

Ключевые слова: карьерный экскаватор, режимные параметры главных механизмов, двухкривошипно-рычажный механизм рабочего оборудования, энергосиловые параметры.

ведение

Карьерные одноковшовые экскаваторы являются основным средством механизации выемочно-погрузочных операций на открытых горных работах.

В современных условиях конкурентного развития экономики особое значение приобретает проблема повышения технического уровня карьерных экскаваторов и создание высокопроизводительного и ресурсосберегающего оборудования.

Решение этой важнейшей проблемы основывается на комплексном использовании результатов научных исследований как в области машиноведения, так и связанных с изучением рабочих процессов технологических машин.

Основными направлениями исследований по данной проблеме, отраженными в последних публикациях, являются:

– моделирование рабочего процесса с целью обоснования рациональных значений конструктивных и режимных

- моделирование рабочего процесса с целью обоснования рациональных значении конструктивных и режимных параметров главных механизмов [1–7];
- оценка технического уровня (технических и технологических показателей функционирования) карьерных экскаваторов [8–16].

Вместе с тем вопросы, связанные с изучением режимов работы главных исполнительных механизмов карьерных экскаваторов (подъемного и напорного), в известных публикациях рассматриваются недостаточно полно. В частности, не изучен вопрос взаимодействия главных механизмов при их совместной работе в процессе экскавации горных пород в различных областях рабочей зоны экскаватора (нижней, верхней и т. п.).

Анализ характера взаимодействия главных исполнительных механизмов при их совместной работе в процессе экскавации горных пород в конкретных горнотехнических условиях отработки экскаваторного забоя позволит повысить эффективность функционирования экскаватора.

Цель и задачи работы

Цель работы – повышение эффективности управления процессом копания за счет согласования режимных параметров (скоростей и усилий подъема и напора) главных механизмов карьерного экскаватора.

Задачи работы:

- установление взаимозависимостей между режимными параметрами (скоростями и усилиями) главных механизмов;
- согласование режимных параметров и определение рациональных значений параметров для конкретных условий работы.

Объектом исследования является рабочий процесс экскавации горной массы, заключающийся в перемещении ковша (вершины режущей кромки) по эквидистантным траекториям с одновременным отделением слоя («стружки») горной массы постоянной толщины.

*Komissarov_a_p@mail.ru

| https://orcid.org/0000-0003-4320-8111

| yu.lagunova@mail.ru
| https://orcid.org/0000-0002-3828-434X

**oldim96@mail.ru

²Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина, Россия, Екатеринбург

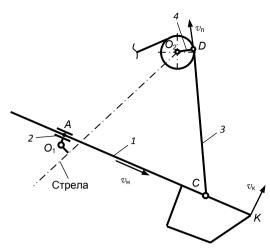


Схема механизма рабочего оборудования. 1 – звено «рукоять–ковш»; 2 – седловой подшипник; 3 – подъемный канат; 4 – головной блок; v_{μ} , v_{η} , v_{η} , v_{η} , v_{ψ} – скорости напора, подъема и копания.

The diagram of the mechanism of work equipment. 1 – element "lift-arm-bucket"; 2 – saddle bearing; 3 – hoist rope; 4 – fairlead sheave; v_{μ} , v_{ν} , speed of pressure, hauling-up and excavation.

Предмет исследования заключается в выявлении взаимосвязей между режимными параметрами главных механизмов и энергосиловыми параметрами, реализуемыми на режущей кромке зубьев ковша при копании, для конкретных условий эксплуатации.

В качестве метода исследований принят вычислительный эксперимент, выполняемый на основе имитационной модели процесса экскавации грунта рабочим оборудованием прямая лопата [8, 10]. Для алгоритмических моделей экспериментирование с помощью модели тождественно нахождению значений выходных характеристик при заданных значениях входных переменных и постоянных аргументов, т. е. подстановке в алгоритм конкретных чисел и расчету по формулам. Перебор вариантов решений производится с заданным шагом варьирования. В ходе просчета и калибровки математической модели накапливается информация о функциональных возможностях различных структурных схем рабочего оборудования. Таким образом, имитационное моделирование состоит в многократном воспроизведении функционирования (поведения) исследуемой системы на основе математической модели. Результаты имитационного моделирования представляют собой набор величин, характеризующих исследуемый процесс.

В процессе экскавации горной массы при совместной работе главных исполнительных механизмов (механизмов подъема и напора) образуется механизм рабочего оборудования, связывающий главные механизмы с ковшом.

Двухкривошипно-рычажный механизм рабочего оборудования (рисунок) включает четыре подвижных звена: звено 1 в виде жестко соединенных рукояти и ковша (в дальнейшем звено – «рукоять–ковш»), образующее со стойкой O_1 двухподвижную пару (поступательную и вращательную) посредством седлового подшипника – звена 2; звено 3 – подъемный канат и звено 4 – головной блок стрелы. Звенья 3 и 4 кинематически эквивалентны стержням, образующим вращательные пары между собой, со звеном 1 и стойкой O_2 . Звенья 2 и 4 представляют собой выходные звенья главных механизмов напора и подъема. При этом скорость точки A звена A равна скорости напора A0, а скорость точки A1 равна скорости подъема A1.

При управлении рабочим процессом экскавации, т. е. формирования заданной траектории перемещения ковша, ковш становится ведущим (и начальным) звеном общего передаточного механизма (механизма рабочего оборудования и главных механизмов). В этом случае положения звеньев и режимные параметры главных механизмов определяются в зависимости от положения ковша в рабочей зоне, а также от кинематических свойств механизма рабочего оборудования.

Режимные параметры главных механизмов определены на основе вычислительного эксперимента, выполненного для экскаватора ЭКГ-20А производства ПАО «Уралмашзавод».

Исходные данные для расчета:

- размеры рабочей зоны экскаватора высота оси напорного вала $H_{_{\rm H}}=12$ м, максимальная высота копания $H_{_{\rm K\ max}}=17$ м, минимальный и максимальный радиусы копания на уровне стояния экскаватора $R_{_{\rm K\ y.\ c\ min}}=9$ м и $R_{_{\rm K\ y.\ c\ max}}=18$ м, максимальный радиус копания $R_{_{\rm K\ max}}=23,4$ м;
 - геометрические (линейные и угловые) размеры элементов рабочего оборудования;
 - массы элементов рабочего оборудования рукояти $M_{\rm p}=30~{\rm T}$; ковша $M_{\rm k}=40~{\rm T}$ и груженого ковша $M_{\rm k+n}=70~{\rm T}$;
- сила сопротивления породы копанию (касательная составляющая): при расчетной высоте копания $H_{\text{pacu}}^{r+1} = H_{\text{H}} F_{cl}^{\tau} = 325 \text{ кH и при максимальной высоте копания } F_{c2}^{\tau} = 230 \text{ кH}.$

В таблице приведены результаты расчета режимных параметров главных механизмов (скорости подъема $v_{_{\Pi}}$ и напора $v_{_{H}}$, усилия подъема $F_{_{\Pi}}$ и напора $F_{_{H}}$) при перемещении ковша в пределах рабочей зоны по начальной, средней (т. е. в центре рабочей зоны экскаватора) и конечной траекториям с углом наклона, соответствующим углу откоса уступа.

Из приведенных данных видно, что режимные параметры главных механизмов (скорости и усилия подъема и напора) изменяются в пределах рабочей зоны экскаватора в широком диапазоне и зависят как от высоты копания (координаты $Y_{_{\rm K}}$) или удаления траектории перемещения ковша от экскаватора.

Режимные параметры главных механизмов экскаватора ЭКГ-20А.

The standard parameters of propulsion machinery of the EKG-20A excavator.

Номер _	I	∕Iсходные данны	е	Расчетные данные				
позиции	$X_{_{\mathrm{K}}}$, M	Υ _κ , Μ	G _{к+п} , кН	$v_{\rm n}$, M/C	$v_{_{ m H}}$, M/C	F _п , кН	<i>F</i> _н , кН	
			Начальная траен	стория (X _{к0} = 9 м)				
1	9,00	0	400	0,95	-0,87	290	-630	
2	10,15	2	435	0,92	-0,81	350	-620	
3	11,30	4	470	0,84	-0,70	420	-605	
4	12,45	6	500	0,70	-0,51	520	-580	
5	13,60	8	540	0,52	-0,19	700	-555	
6	14,75	10	575	0,50	0,19	975	-590	
7	15,90	12	610	0,66	0,50	1270	-700	
8	17,05	14	650	0,80	0,70	1560	-850	
9	18,20	16	680	0,89	0,81	1810	-1005	
10	18,80	17	700	0,91	0,84	1910	-1060	
			Средняя траекто	ория (X _{к0} = 13,5 м _,)			
11	13,50	0	400	0,88	-0,64	610	-310	
12	14,65	2	435	0,83	-0,51	640	-300	
13	15,80	4	470	0,76	-0,34	680	-280	
14	16,95	6	500	0,70	-0,12	710	-230	
15	18,10	8	540	0,66	0,11	780	-155	
16	19,25	10	575	0,65	0,32	830	-40	
17	20,40	12	610	0,62	0,50	885	140	
18	21,55	14	650	0,50	0,63	930	420	
19	22,70	16	680	0,22	0,72	105	845	
20	23,30	17	700	0,02	0,76	1125	1130	
			Конечная траекп	пория (X _{к0} = 18 м)				
21	18,00	0	400	0,79	-0,39	1020	110	
22	19,15	2	450	0,73	-0,25	1060	150	
23	20,30	4	500	0,68	-0,09	1100	210	
24	21,45	6	550	0,61	0,07	1150	320	
25	22,60	8	600	0,53	0,23	1210	480	
26	23,75	10	650	0,42	0,38	1290	710	
27	24,90	12	700	0,27	0,50	1420	1030	

Расчеты показывают, что в рабочей зоне экскаватора имеются критические участки, в которых режимные параметры принимают экстремальные значения.

Так, при перемещении ковша по начальной траектории усилие подъема значительно возрастает с ростом высоты копания ввиду уменьшения плеча усилия подъема относительно точки O_1 (оси напорного вала) и при максимальной высоте копания усилие подъема достигает предельного значения, соответствующего стопорному моменту на валу двигателя подъемного механизма. При этом соответственно возрастает и усилие напора, которое направлено в сторону оси напорного вала (усилие напора имеет знак «минус») и уравновешивает усилие подъема.

При перемещении ковша по средней траектории скорость подъема уменьшается и при максимальной высоте копания имеет практически нулевое значение, т. е. двигатель подъемного механизма работает в режиме тормоза. В этом случае (при копании в верхней части забоя) перемещение ковша осуществляется в основном за счет напорного механизма.

В процессе копания при перемещении ковша по крайней траектории двигатели обоих механизмов (подъемного и напорного) работают в форсированных режимах, причем с ростом высоты копания двигатель подъемного механизма «слает позиции»

Таким образом, при совместном действии главных механизмов карьерного экскаватора в процессе экскавации горных пород происходит преобразование режимных параметров подъемного и напорного механизмов в соответствии с кинематическими свойствами рычажного механизма рабочего оборудования.

В результате изменяются режимы работы двигателей главных механизмов и значения скоростей и усилий подъема и напора, что затрудняет ведение процесса экскавации пород.

Оценка фактических значений режимных параметров подъемного и напорного механизма при конкретной технологической схеме отработки забоя позволит повысить качество управления рабочим процессом.

Анализ степени взаимодействия приводов главных механизмов карьерного экскаватора при экскавации горных пород в конкретных горнотехнических условиях эксплуатации позволит обосновать адаптивную систему управления рабочим процессом.

В целом эффективное управление процессом копания и достижение требуемого закона движения ковша возможно при практически непрерывном контроле положения ковша в забое и постоянном регулировании скоростей рабочих движений.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Bender F. A., Sawodny O. A Predictive driver model for the virtual excavator // The 13th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV), Singapore, IEEE, Dec. 10–12, 2014. P. 187–192. https://doi.org/10.1109/ICARCV.2014.7064302
- 2. Schmidt D., Proetzsch M., Berns K. Simulation and control of an autonomous bucket excavator for landscaping tasks // Proceedings of the IEEE ICRA, Anchorage, Alaska, USA, May 3–8, 2010. P. 5108–5113. https://doi.org/10.1109/ROBOT.2010.5509546
- 3. Frimpong S., Hu Y., Chang Z. Performance simulation of shovel excavators for earthmoving operations // Proceedings Summer Computer Simulation Conference (SCSC/03). Cherry Hill, New Jersey, USA, 2003. P. 133–138.
- 4. Le Q. H., Jeong Y. M., Nguyen C. T., Yang S. Y. Development of a Virtual Excavator using SimMechanics and SimHydraulic // Journal of Drive and Control. 2013. Vol. 10, issue 1. P. 29–36. https://dx.doi.org/10.7839/ksfc.2013.10.1.029
- 5. Liu J. Integrated mechanical and electrohydraulic system modeling and virtual reality simulation technology of a virtual robotic excavator // Computer-Aided Industrial Design & Conceptual Design // IEEE 10th International Conference on Computer-Aided Industrial Design & Conceptual Design. Wenzhou, China, 2009. P. 797–802. http://dx.doi.org/10.1109/CAIDCD.2009.5375156
- 6. Перепелкин М. А. Применение математических моделей при разработке строительно-дорожных, горных машин и оборудования // Горная промышленность. 2017. № 4 (134). С. 82–85.
- 7. Савченко А. Я. Совершенствование методологии оценки качества высокопроизводительного экскавационного оборудования большой единичной мощности на этапе эксплуатации // Горные машины и автоматика. 2001. № 1. С. 4–6.
- 8. Воронов Ю. Е., Зыков П. А. Решение задачи оптимизации параметров карьерных одноковшовых экскаваторов // Изв. вузов. Горный журнал. 2012. № 8. С. 12–15.
- 9. Ганин А. Р., Самолазов А. В., Донченко Т. В. Внедрение экскаваторов нового модельного ряда производства ООО «ИЗ-КАРТЭКС им. П. Г. Коробкова» на горных предприятиях России // Уголь. 2012. № 8. С. 60–62.
- 10. Интенсификация процессов экскавации горных пород / И. Ю. Иванов [и др.] // Изв. вузов. Горный журнал. 2015. № 3. С. 94–99
- 11. Кузнецов А. Л., Анистратов К. Ю. Карьерные экскаваторы ПАО «Уралмашзавод» настоящее и будущее российской горнодобывающей промышленности // Уголь. 2016. № 8. С. 77–81.
- 12. Певзнер Л. Д., Бабаков С. Е. Управление операцией черпания карьерного экскаватора-мехлопаты с применением нечеткой логики // Уголь. 2012. № 8. С. 64–65.
- 13. Певзнер Л. Д. Автоматизированное управление мощными одноковшовыми экскаваторами. М.: Горное дело, 2014. 396 с.
- 14. Повышение качества управления одноковшовыми экскаваторами на основе мультиагентного подхода / А. В. Дружинин [и др.] // Новые огнеупоры. 2016. № 3. С. 11–12.
- 15. Рехтман А. П., Крагель А. А. Комплексные испытания экскаватора ЭКГ-12 // Механизация строительства. 2001. № 1. С. 24–26.
- 16. Самолазов А. В., Донченко Т. В., Шибанов Д. А. Практические результаты внедрения экскаваторов ЭКГ-18Р и ЭКГ-32Р производства ООО «ИЗ-КАРТЭКС им. П. Г. Коробкова» на угледобывающих предприятиях России // Уголь. 2013. № 4. С. 36–38.

Статья поступила в редакцию 16 марта 2018 г.

96

Interaction of the main mechanisms of a mine excavator while shovelling rocks

Anatoliy Pavlovich KOMISSAROV15, Yuliya Andreevna LAGUNOVA^{1,7} Nikita Sergeevich PLOTNIKOV^{1,17} Olga Anatol'evna LUKASHUK^{2,**} Vil Irkhuzheevich SAITOV1

¹Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia

²Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

Relevance of the work is determined by the research topic – the study of modes of operation and the degree of interaction of the main mechanisms (lifting and pressure) of a mine excavator in the process of shovelling the rock mass. The development of designs for mine excavators (shovels), which are unique technical objects, is characterized by critical discrepancy between the technical perfection of the structures and the complexity of control of the shovelling process. In the technical literature, there is no information about the modes of joint operation of the main mechanisms of mine excavators in the process of shovelling; developed control algorithms for operating processes are based on abstract models (methods of fuzzy logic, multiagent technologies, etc.). For the first time, an algorithmic description of the process was carried out and the operating modes of the main mechanisms were determined to ensure the movement of a bucket (tooth tip of a cutting edge) in a predetermined path. It is shown that with the joint operation of the main mechanisms, the conversion of the operating parameters of the mechanisms into energy-power parameters in a bucket occurs depending on the kinematic properties of the double crank mechanism of the working equipment connecting the main mechanisms with the bucket. As a result of simulation experiments, variation range in the speed and lifting force when the bucket is moved within the working area of the excavator are determined.

Results and their application. The developed method for determining the operating parameters of the main mechanisms will allow the creation of an automated digital control system for the excavation process, adapted to the specific mining conditions of operation and the parameters of the working place, which ultimately will increase the efficiency of a mine excavator.

Keywords: mine excavator, standard parameters of propulsion machinery, double crank mechanism and implement linkage, power parameters.

REFERENCES

- 1. Bender F. A., Sawodny O. A. 2014, Predictive Driver Model for the Virtual Excavator. The 13th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICÁRCV), Singapore, IEEE, Dec. 10-12. pp. 187-192. https://doi.org/10.1109/ICARCV.2014.7064302
- 2. Schmidt D., Proetzsch M., Berns K. 2010, Simulation and control of an autonomous bucket excavator for landscaping tasks. Proceedings of the IEEE ICRA, Anchorage, Alaska, USA, May 3-8, pp. 5108-5113. https://doi.org/10.1109/ROBOT.2010.5509546
- 3.Frimpong S., Hu Y., Chang Z. 2003, Perfomance simulation of shovel excavators for earthmoving operations. Summer in computer simulation conference (SCSC/03). Cherry Hill, New Jersey, USA, pp. 133–138.
- 4. Le Q. H., Jeong Y. M., Nguyen C. T., Yang Ś. Y. 2013, Development of a Virtual Excavator using SimMechanics and SimHydraulic. Journal of Drive and Control, vol. 10, issue 1, pp. 29-36. https://dx.doi.org/10.7839/ksfc.2013.10.1.029
- 5. Liu J. 2009, Integrated mechanical and electrohydraulic system modeling and virtual reality simulation technology of a virtual robotic excavator. Computer-Aided Industrial Design & Conceptual Design. IEEE 10th International Conference. Wenzhou, China, pp. 797-802. http://dx.doi. org/10.1109/CAIDCD.2009.5375156
- 6. Perepelkin M. A. 2017, The use of mathematical models in the development of road construction, mining machinery and equipment. Gornaya promyshlennost' [Mining Industry], no. 4 (134), pp. 82-85. (In Russ.)
- 7. Savchenko A. Ya. 2001, Improving the methodology for assessing the quality of high-performance and heavy-duty excavation equipment at the operational stage. Gornyye mashiny i avtomatika [Mining equipment and electromechanics], no. 1, pp. 4-6. (In Russ.)
- 8. Voronov Yu. E., Zykov P. A. 2012, A solution to the optimization of parameters of career shovel excavators. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi Zhurnal [News of the Higher Institutions. Mining Journal], no. 8, pp. 12-15. (In Russ.)
- 9. Ganin A. R., Samolazov A. V., Donchenko T. V. 2012, Introduction of new model line of excavators produced by IZ-KARTEX named after P. G.
- Korobkov at the mining enterprises of Russia. *Ugol'* [Russian coal journal], No 8, pp. 60-62. (*In Russ.*)

 10. Ivanov I. Yu., Komissarov A. P., Lagunova Yu. A., Shestakov V. S. 2015, Intensification of processes of excavation of rocks. *Izvestiya vysshikh* uchebnykh zavedenii. Gornyi Zhurnal [News of the Higher Institutions. Mining Journal], no. 3, pp. 94-100. (In Russ.)
- 11. Kuznetsov A. L., Anistratov K. Yu. Ю. 2016, Mining excavators of PAO Uralmashzavod today and tomorrow in the Russian mining industry. Ugol' [Rusian coal Journal. Ugol'], no. 8, pp. 77-81. (In Russ.)
- 12. Pevzner L. D., Babakov Š. E. 2012, Managing the operation of digging with a mining power shovel using fuzzy logic. Ugol' [Russian coal journal], no. 8, pp. 64-65. (In Russ.)
- 13. Pevzner L. D. 2014, Avtomatizirovannoye upravleniye moshchnymi odnokovshovymi ekskavatorami [Automated management of powerful shovel excavators]. Moscow, 396 p.
- 14. Druzninin A. V., Volkova E. A., Nagatkin E. Yu., Poluzadov V. N. 2016, Improving the quality of control of shovel excavators based on the multi-agent approach. Novye ogneupory [New refractories], no. 3, pp. 11–12. (In Russ.)
- 15. Rekhtman A. P., Kragel A. A. 2001, Overall tests of the EKG-12 excavator. Mekhanizatsiya stroitel'stva [Mechanization of construction], no. 1, pp. 24-26. (In Russ.)
- 16. Samolazov A. V., Donchenko T. V., Shibanov D. A. 2013, Practical results of the introduction of EKG-18R and EKG-32R excavators manufactured by IZ-KARTEX named after P.G.Korobkov at coal-mining enterprises of Russia. Ugol' [Russian coal journal], no. 4, pp. 36–38. (In Russ.)

The article was received on March 16, 2018

*Komissarov_a_p@mail.ru https://orcid.org/0000-0003-4320-8111 yu.lagunova@mail.ru https://orcid.org/0000-0002-3828-434X *oldim96@mail.ru

УДК 622.83

Фундаментальные проблемы практической геомеханики и возможные пути их преодоления

Андрей Викторович ЖАБКО*

Уральский государственный горный университет, Россия, Екатеринбург

Актуальность темы исследований обусловлена тем, что в геомеханике существуют объективные проблемы, связанные с некорректностью представления горного массива континуальной средой. В связи с этим появляются фундаментальные проблемы определения прочностных и деформационных свойств горных массивов, расчета их напряженно-деформированного состояния.

Шелью исследования является обобщение существующих проблем геомеханики, выделение из них наиболее значимых и фундаментальных, а также обсуждение возможных путей их преодоления.

Методы исследований. В работе широко использованы аналитические методы исследований с экспериментальной проверкой приводимых **результатов.**

Результаты и их применение. В работе предложены аналитические критерии пластичности и прочности горных пород и других искусственных материалов, а также функция пластического потенциала для сдвигового характера пластического деформирования и разрушения на основе представления твердых тел континуальной (сплошной) средой. Предлагаемые критерии и функция пластического потенциала сопоставлены и скорректированы с экспериментальными исследованиями по разрушению горных пород в сложном напряженном состоянии. Предложен вариационный принцип дезинтеграции горных массивов, позволяющий определять геометрию поверхностей дезинтеграции. Из данного принципа непосредственно следует, что поверхностью дезинтеграции минимизируются площади (объемы) с пониженным потенциалом (пластические) и увеличиваются площади с повышенным потенциалом (упругие, энергоемкие), при этом минимизируется энергия, затрачиваемая на создание поверхностей дезинтеграции и главные напряжения при разрушении объемными силами (например, гравитация). Предложен критерий роста трешины или фундаментальный параметр иерархии (линейный коэффициент вложения блоков), установлено, что его значение определяется углом внутреннего трения как мерой диссипации энергии при срезе. При рассмотрении горного массива как дискретной блочной среды получено уравнение по типу sin-Гордона, описывающее динамику его деформирования.

ВЫВОЛЫ. По результатам выполненных исследований предложен целый ряд критериев, принципов и зависимостей, определяющих процессы пластического деформирования и разрушения (дезинтеграции) горных пород на основе континуальной и блочно-иерархической моделей горного массива.

Ключевые слова: проблемы геомеханики, прочностные и деформационные свойства горных массивов, дезинтеграция и разрушение горных пород, пластическое деформирование, уравнение sin-Гордона.

Ведение Геомеханика – это фундаментальная часть горной науки, изучающая физико-механические свойства горных пород и массивов, их напряженно-деформированное состояние и разрушение, развивающееся под влиянием природных и горнотехнических факторов. Это весьма лаконичное и точное определение геомеханики как науки само по себе уже содержит все ее проблемы.

Для понимания проблем геомеханики вначале необходимо определить ее место среди других технических наук.

Появление и бурное развитие технических наук было обусловлено тем фактом, что теоретическое значение прочности, получаемое из физических (естественнонаучных) предпосылок на молекулярно-ионном уровне, в 500–1000 раз выше прочности реальных твердых тел. Невозможность использования простой экстраполяции для перехода от атомного строения материалов к практическому определению их свойств и прочности явилось, пожалуй, крупнейшим разочарованием в физической науке о поведении материалов [1]. Это способствовало развитию технического (феноменологического, континуального или сплошносредного) подхода к обоснованию прочности твердых тел.

Фактически отправной точкой или доктриной любой технической науки является понятие «континуум» – сплошная среда, абстрактно введенная и не существующая в реальности материя. Однако такое понятие есть необходимость, с математической точки зрения, для возможности использования аппарата интегрального и дифференциального исчисления (непрерывность функций).

Только после введения данной абстрактной среды появляется возможность исследовать процессы деформирования и разрушения с иных позиций. Теперь речь стала идти не о силовом взаимодействии частиц, а о механических напряжениях, действующих на некоторых площадках тела, непрерывно заполняющего пространство. В более общем случае речь идет о пространственно-временном континууме.

Именно такой подход послужил катализатором научно-технического прогресса. И действительно, большинство окружающих нас материалов – континуальные среды. Жидкость (вода), газ, конструкционные материалы, получаемые человеком с заведомо заданными свойствами (сталь, кирпич, композиты, стекло) и т. д. Успехи механики сплошной среды (гидромеханика, акустика, теория упругости и термоупругости, пластичности и т. д.) дали толчок в развитии самолетостроения, ракетостроения, кораблестроения, машиностроения, строительства промышленных и гражданских сооружений, напорных гидротехнических сооружений, железных дорог и т. д. Еще больший скачок произошел с появлением численных методов решения задач механики сплошной среды (метод конечных элементов МКЭ), реализуемых в программном обеспечении. Появилась возможность решать задачи для тел с произвольной конфигурацией и граничными условиями с заведомо заданной точностью.

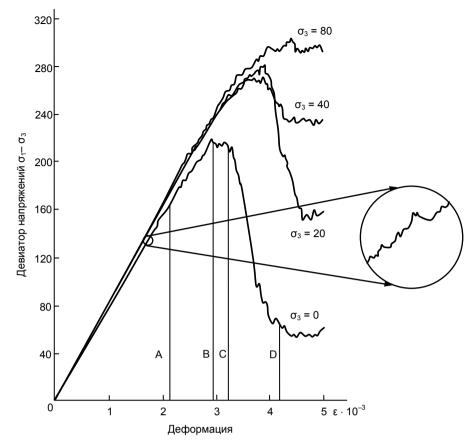


Диаграмма напряжение—деформация для образцов гранита при различном боковом обжатии и малом интервале времени замеров [3].

Stress-deflection chart for the granite sample with differential edging and short-time measurement [3].

Проблемы геомеханики

К сожалению, сказанное неприменимо к горному делу, а точнее, к геомеханике. Реальный горный массив ниже четвертичных отложений, которые являются средой для других технических специалистов (строителей, гидротехников, железно- и автодорожников), является весьма трещиноватой (блочной) средой. И если в первозданном виде его еще можно рассматривать как сплошную среду, то после его деформаций и локальных разрушений, вызванных проведением горных выработок, данный постулат будет некорректен. Действительно, практически любой геомеханический процесс сопровождается деформированием горного массива как квазисплошной среды, а также разрушением и перемещением дезинтегрированных горных пород. Это затрудняет использование механики сплошной среды для прогнозирования напряженно-деформированного состояния, а точность данного прогноза становится неопределенной. Более того, данная среда, в большинстве своем имеющая иерархически блочное строение (исключением могут выступать сланцеватые породы, т. е. поверхности дезинтеграции есть, а вложения отсутствуют), пребывает в постоянном движении, примерно несколько сантиметров в год. Это движение, по данным некоторых исследователей, приводит к «мозаичности» или «дискретности» напряженно-деформированного состояния горного массива, т. е. зоны сжатия (концентрации) сменяются зонами растяжения (депрессии) или «мертвыми» недеформируемыми зонами. Более того, выделяют трендовую составляющую геодинамических движений, которая имеет относительно постоянную скорость и направление и циклическую, имеющую полигармонический характер и продолжительность от секунд до часов и дней [2].

То есть существует мнение, что механика сплошной среды в принципе непригодна для описания процессов, происходящих в горном массиве. Трещиноватость и иерархичность (самоорганизация) горного массива придают ему заведомо нелинейные свойства, а процессы деформирования, дезинтеграции, релаксации напряжений и ползучести, происходящие в нем, связаны с нелинейными, в том числе медленными волнами, вызванными перемещениями и деформациями структурных элементов. В связи с этим очень сложно говорить об эквивалентности горного массива и линейной гуковской среды.

Иерархическое и самоподобное (фрактальное) строение горного массива подразумевает его самоорганизацию и при дезинтеграции. В работе [3] приводится диаграмма деформирования образца гранита (рисунок) с малым интервалом времени замеров. Анализ данных кривых показывает, что они имеют фрактальную природу. Таким образом, трендовое общее упругое поведение образца горной породы включает в себя ряд скачков и спадов, в целом повторяющих качественную форму всей кривой [3].

Это говорит о том, что упругое поведение всего образца в целом возможно при межзеренном скольжении (запредельном деформировании) на более мелком масштабном уровне. То есть пластическое деформирование и разрушение имеется и на упругой фазе деформирования образца, однако эти деформации развиваются на очень «далеком» мас-

штабном уровне, а видимые пластические деформации мы наблюдаем, когда размер образовывающихся микротрещин будет находиться с размером образца в определенном соотношении. Таким образом, вообще некорректно говорить об упругом или пластическом поведении горных пород и массивов, не указав размеры рассматриваемого и нагружаемого массивов.

Так, когда мы говорим, что среда сплошная и упругая, подразумевается, что упругим является как бесконечно малый элемент этой среды, так и все тело в целом. Но когда речь заходит об иерархически блочном массиве, упругое поведение объекта в целом, например тектонической плиты или блока, абсолютно не означает такого же состояния на более мелком иерархическом уровне. В этом и состоит принципиальное отличие рассматриваемых сред. С другой стороны, зерна, образующие образец, имеют, как правило, более высокие прочностные и деформационные характеристики, чем сам образец или межзеренные участки, поэтому они также пребывают в упругой фазе деформирования.

Таким образом, первая и основная проблема геомеханики является методологической, т. е. горный массив – это блочная среда, описание физического поведения которой под нагрузкой не представляется возможным в силу отсутствия математического аппарата механики блочных сред.

В последнее время большое развитие получают модели дискретных сред, однако, в силу сложностей, связанных с параметрическим обеспечением данных моделей (отсутствие методик экспериментального установления значений), неопределенностей, вызванных недостаточной обоснованностью характера взаимодействия (упругий, предельно напряженный, вязкий и т. д.) смежных блоков массива, их практическое применение ограничено. Имеются работы по приспособлению механики сплошной среды для массивов с блочной структурой посредством применения контакт-элементов с фиктивной толщиной [4].

Фактически единственным выходом при недостаточном на сегодняшний день развитии механики дискретных или блочных сред является использование для прогноза напряженно-деформированного состояния модели сплошных сред и при этом наделение горного массива некоторыми эквивалентными или интегральными деформационными и прочностными свойствами. Отметим, что модуль упругости трещиноватого массива в несколько раз ниже модуля деформации образцов (структурных блоков), а вот сцепление массива может составлять от 1 до 50 % сцепления ненарушенного трещинами образца. Причем важно, что коэффициенты структурного ослабления при расчете подземных горных выработок обычно составляют 0,1–0,5, а при расчете бортов карьеров и разрезов, как правило, 0,01–0,06. То есть сцепление массива не является константой, а зависит от размеров рассчитываемых элементов систем разработок, степени их обнажения или разгрузки. Более того, сцепление трещиноватого массива в большей степени определяется сцеплением трещин, которое, вследствие фрактальной природы и в зависимости от условий нагружения, может изменяться от нуля до значений сцепления образца, т. е. десятков мегапаскалей.

Разрушение горного массива как блочной среды весьма отлично от представлений о разрушении сплошной среды, обладающей трением и сцеплением. Подразумевается, что сплошная среда разрушается по плоской поверхности под действием нормальных и касательных напряжений на площадке среза. Разрушение же реального горного массива сопровождается скольжением по существующим трещинам отдельности и разворотом структурных элементов (трансляционное и ротационное движение блоков), т. е. все это уже не сдвиговое разрушение в классическом понимании. В связи с этим и величина сцепления уже носит несколько условный характер. Это же можно сказать и про модуль упругости горного массива, деформирование которого вызвано как деформацией самих структурных блоков, так и межблочным проскальзыванием. Что касается коэффициента Пуассона (коэффициента поперечного расширения), то для трещиноватого массива его физическая природа становится неясной, а методик его определения фактически просто не существует.

Тем не менее считается, что существуют некоторые эквивалентные и осредненные характеристики горного массива, которые смогут охарактеризовать его напряженно-деформированное состояние в рамках механики сплошной среды и его разрушение в рамках критерия Кулона. Однако ввиду отсутствия общей теории, описывающей сложный ротационно-трансляционный характер пластического деформирования и разрушения блочных сред (и даже образцов пород с тем же характером разрушения), на практике данные характеристики определяются, как правило, с использованием эмпирических формул и обратных расчетов.

В связи с этим появляется вторая фундаментальная проблема геомеханики – обоснование прочностных и деформационных характеристик трещиноватого горного массива. Не лишним в связи с этим будет сказать и про то, что в силу больших размеров шахтных и карьерных полей, изменчивости свойств горных пород (структурных блоков) и элементов трещиноватости (простирание, падение, размер, форма, заполненность) отношение объемов выборки к размеру массивов будут иметь порядок ниже 10^{-10} . Это говорит о том, что и механические характеристики самих структурных элементов (образцов) установлены недостаточно. То есть при таком объеме выборки достоверность параметров очень низкая.

В связи с этим необходимо добавить следующее. В отличие от других отраслей инженерных (технических) знаний в геомеханике нет возможности «подобрать материал» для «конструирования и строительства». Любой проектировщик (ракет, самолетов, поездов, кораблей, машин, зданий, сооружений и др.) имеет возможность выбрать материал по прочности, массе и иным характеристикам. К сожалению, в геомеханике и горном деле такой возможности не имеется. Все то, что создано сложнейшими эндогенными и экзогенными геологическими процессами, включая высоконапорные водоносные горизонты, потенциальную карстоопасность, метаноопасность, плывуны, перенапряженные геологические нарушения, которые приводят при эксплуатации месторождений к разрушению выработок, горным ударам и землетрясениям, затоплению шахт, взрывам метано-воздушной смеси и гибели сотен горняков, и является безальтернативной средой для ведения в ней горных работ. То, что можно сделать в данных стихийных условиях, – выбрать порядок отработки месторождения (систему разработки), что и называется управлением горным давлением и составляет предмет геомеханики.

Большинство конструкционных материалов являются материалами пластического разрушения, для которых фактически отсутствует понятие предела прочности на сжатие, а их расчет осуществляется на растяжение. Практически

все горные породы относятся к материалам хрупкого разрушения, т. е. материалам, обладающим внутренним трением. Сдвиговое разрушение материалов, обладающих внутренним трением, является весьма сложным процессом, сопровождающимся дилатансией. Таким образом, даже в случае принятия модели сплошной среды появляется ряд специфических вопросов при описании деформирования пород в пластической фазе. Фактически можно утверждать, что на сегодняшний день для сдвигового характера деформирования горных пород и сложного (объемного) напряженного состояния в литературе отсутствуют теоретически обоснованные и подтвержденные экспериментом критерии пластичности и прочности, функция пластического потенциала и зависимости, определяющие коэффициент дилатансии. В связи с этим в качестве поверхности текучести и функции пластического потенциала используется предельная кулоновская поверхность. Поэтому коэффициент дилатансии, рассчитанный согласно ассоциированному закону пластического течения, в несколько раз превышает экспериментальные значения, а область упругости ассоциирована с предельной. Это, в свою очередь, приводит к значительному завышению дилатантных изменений при пластическом деформировании и искажению результатов моделирования напряженно-деформированного состояния.

Заметим, что если утрировать понятие горного дела, то можно сказать, что оно сводится к разрушению горных пород. И действительно, отработка месторождения сводится к проведению разного рода выработок (скважин, вскрывающих капитальных, подготовительных, нарезных, очистных и т. д.), при этом основным технологическим процессом является разрушение (бурение – буримость, взрывание – взрываемость, вторичное дробление, рудоподготовка при обогащении – дробимость). Напротив, геомеханика исследует условия устойчивости и прочности массива. Как в первом, так и во втором случае необходимо располагать условиями, при которых происходит разрушение (критерии прочности и пластичности), с которыми, как показано ранее, имеются сложности. В связи с этим исследования условий сдвигового разрушения горных пород как материалов, обладающих внутренним трением и сцеплением, также представляют серьезную и даже первостепенную научную проблему.

Одной из главных задач геомеханики является прогнозирование развития опасных геомеханических процессов. Большинство важных вопросов приходится решать на стадии проектирования, в условиях, когда фактически отсутствуют данные о естественном напряженном состоянии массивов, параметрах процесса сдвижения (углы сдвижения, разрывов) горных пород, элементах трещиноватости массивов и т. д.

Естественное напряженное состояние (напряжения, существующие до начала ведения горных работ) выступает в качестве граничных условий при расчете напряженно-деформированного состояния в элементах системы разработки с использованием моделей механики сплошной среды. Если вертикальная компонента главных напряжений практически во всех случаях определяется гравитацией, т. е. близка по величине к пресловутой γH , то горизонтальная (тектоническая) компонента весьма неопределенна. По данным натурных определений, ее величина может варьироваться в очень широких пределах (0,5-12) үН. Однако получить достоверные данные о тектонической составляющей напряжений возможно только проведя специальные исследования в горных выработках, да и то с неопределенной точностью. Дело в том, что существующие способы определения естественных полей напряжений основаны на нагрузке или разгрузке массива малой или большой базы, измерении геометрических параметров деформаций (смещений, конвергенции выработок и т. д.) и их пересчете в компоненты напряжений с использованием математического аппарата теории упругости. Однако главным недостатком такой схемы является использование структурозависимых упругих параметров массива. Таким образом, задача по прогнозированию напряженно-деформированного состояния и возможности разрушения горного массива ставится фактически следующим образом: определить напряжения и деформации в элементах системы разработки при неизвестных нагрузках, что, конечно, невозможно. Таким образом, исходное напряженное состояние горного массива также представляет серьезную проблему в геомеханике. Опять же уместно сравнение с другими техническими направлениями. Если мы проектируем здание, мы знаем его высоту, а соответственно и максимальную нагрузку; если подводную лодку, то регламентируется глубина ее погружения, а значит, и нагрузка.

Аналогичная ситуация возникает при выборе места закладки вертикального шахтного ствола. Как известно, его устье должно быть вынесено за область (зону) опасных деформаций, определяемую углами сдвижения. Однако надежное установление значений углов сдвижения возможно лишь при производстве инструментальных маркшейдерских наблюдений уже на подработанной горными выработками территории.

Геомеханика открытой разработки имеет хоть и специфические проблемы, но их причина также тривиальна и фактически обсуждена выше. При оценке устойчивости откосов наибольшую проблему представляет установление расчетных характеристик горного массива, прежде всего величины сцепления [5]. Для определения коэффициента структурного ослабления имеются лишь приближенные эмпирические зависимости, не объясняющие физики разрушения блочных сред или пресловутые обратные расчеты. Еще одной проблемой является установление критических параметров деформирования бортов карьеров, разрезов и откосов отвалов или же времени до обрушения. Таким образом, на первый взгляд, разные проблемы имеют общие корни – отсутствие математического аппарата механики блочных сред.

Отсутствует способ обоснования устойчивых параметров откосов для объемного напряженного состояния, т. е. задача по оценке устойчивости откосов по методу предельного равновесия решается в плоской постановке. Однако данный вопрос лежит в плоскости проблемы влияния промежуточного главного напряжения на прочность горных пород, которая на сегодняшний день не имеет окончательного решения.

Обобщая сказанное, заметим, что задача практической геомеханики на стадии проектирования может быть сформулирована следующим образом: определить предельные параметры элементов системы разработки (размеры опорных целиков, углы разрывов и сдвижения, углы устойчивых откосов и т. д.) в условиях, когда фактически неизвестны физико-механические характеристики горных массивов, действующие нагрузки (естественные или первичные поля напряжений), а расчетная модель сплошной среды не соответствует реальному горному массиву.

То есть задача горного инженера-геомеханика абсолютно подобна задаче других представителей технической науки, однако в случае горного массива данная задача может быть неопределенной. Методы механики сплошной среды (те-

ория упругости и пластичности) хоть и позволяют получить количественные характеристики напряженно-деформированного состояния массива, но не учитывают многих реальных процессов, происходящих в блочном или иерархически блочном горном массиве при его деформировании и наложении на него других механических полей.

Из сказанного ранее следует, что сколько-нибудь достоверное решение геомеханических задач возможно лишь посредством обратных расчетов. Только процесс дезинтеграции материалов и горных пород объединяет в себе прочностные свойства, предельные нагрузки, концентраторы напряжений и, наконец, фактическую геометрию поверхностей дезинтеграции (разрушения, скольжения). Необходимо лишь установить между этими параметрами связь наподобие уравнения состояния. Используемые в геомеханике традиционные феноменологические критерии прочности локальны, т. е. определяют условия разрушения в точке, а не в теле. Кроме того, как уже отмечалось, они устанавливают только предел прочности, вместе с тем поверхности дезинтеграции появляются уже на стадии пластического упрочнения, критерии наступления которого фактически отсутствуют.

Предлагаемые решения

В рамках модели сплошной среды, обладающей внутренним трением φ и сцеплением C, аналитически получен и экспериментально проверен и подтвержден единый критерий пластичности и прочности горных пород (твердых тел) при сдвиге [7–9]:

- в компонентах главных напряжений σ₁, σ₃:

$$\sigma_3 = \sigma_1 - 2C\sqrt{\left(1 + \frac{\operatorname{tg}\,\varphi\,\sigma_1}{C}\right)\left(1 + \frac{\operatorname{tg}\,\varphi\,k\,\sigma_3}{C}\right)};\tag{1}$$

– в компонентах напряжений на площадке среза τ, σ:

$$\tau = C\left(1 + \sin\varphi\right) + \frac{1+k}{1-k}C\sin\varphi\ln\left|\frac{\left(1-k\right)\sigma_n + 2kC\cos\varphi}{\left(1+k\right)C\cos\varphi}\right|,\tag{2}$$

определяющий при k=0 функцию пластического потенциала и начальную поверхность текучести (предел упругости) для горных пород с пластическим характером разрушения; $0 \le k \le 1$ — предел прочности горных пород и предел упругости для горных пород с хрупким характером разрушения ($k \approx 1$ — $\sin \phi$); $k \to 1$ — теоретическую предельную поверхность или предел прочности при сдвиге (срезе), совпадающую с критерием Кулона (Coulomb, 1773 [6]).

На базе решения задачи устойчивости откосов сооружений как континуальной среды получен вариационный принцип дезинтеграции горных пород [7, 8], определяющий функцию поверхности (траекторию) разрушения, который можно сформулировать следующим образом. Форма поверхностей сдвиговой дезинтеграции в твердых телах (горных породах) определяется максимальной работой внешних ΣV и объемных $\Sigma (W-U)$ сил на относительном перемещении частей тела при срезе, при этом минимизируется энергия, затрачиваемая на создание данных поверхностей $\Sigma 2\eta$:

$$\frac{\int_{N} V(x, y, y') dn + \int_{S} \left[W(x, y, y') - U(x, y, y') \right] dS}{\int_{L} 2\eta(x, y, y') dl} \to \max,$$
(3)

где A — удельная работа объемных сдвигающих W и удерживающих U сил на возможном перемещении системы при сдвиговой дезинтеграции (сдвиговый потенциал отсека), A = W - U; V - удельная работа поверхностных сил; $2\eta -$ удельная поверхностная энергия разрушения единицы длины трещины при срезе; dn - элемент нагруженной поверхности тела.

Из принципа (3) следуют достаточно важные выводы. Если внешняя нагрузка постоянна, а объемные силы отсутствуют или ими можно пренебречь, то в однородной среде поверхностями дезинтеграции будут являться плоскости. Примером является дезинтеграция образца горной породы под нагрузкой, массива горных пород под действием тектонических напряжений.

Когда A и η постоянны, а внешняя нагрузка отсутствует, решением вариационного уравнения (3) при отсутствии дополнительных условий для объемной задачи является сфера, а в плоском случае – окружность. Данный результат следует из так называемой изопериметрической задачи (задача Дидоны) и закона ее взаимности. То есть при фиксированной длине максимальную площадь оконтуривает окружность, и наоборот. Длительное время при расчете устойчивости откосов используется поверхность скольжения в виде дуги окружности. Аналогично происходит формирование кольцеобразных перенапряженных зон вокруг подземных горных выработок – явление зональной дезинтеграции, где отдельные сдвиговые трещины своей совокупностью (ломаная линия, включающая сдвиговые и отрывные трещины) в зонах дезинтеграции оконтуривают повышенный потенциал (наблюдается дискование керна), минимизируя длину зон дезинтеграции.

Таким образом, поверхностью дезинтеграции минимизируются площади (объемы) с пониженным потенциалом (пластические) и увеличиваются площади с повышенным потенциалом (перенапряженные, упругие, энергоемкие области), при этом минимизируется энергия, затрачиваемая на создание поверхностей дезинтеграции (их длина). То есть поверхностями (зонами) дезинтеграции отсекается по возможности большее количество потенциальной энергии (сдвиго-

вого потенциала или возможной работы при сдвиге), реализуемой для их создания, и, напротив, уменьшаются размеры пластических областей при минимальном расходе (диссипации) энергии на процесс дезинтеграции.

Отметим, что выражения (1), (2) и (3) являются строгим механико-математическим результатом, полученным из единственного предположения – континуальности (сплошности) среды. Используя данные выражения, можно показать, что радиус кривизны поверхности сдвиговой дезинтеграции пропорционален разности главных напряжений (радиусу круга Мора) и обратно пропорционален объемной силе поля (объемному весу), которая создает данные предельные напряжения:

$$|R| = \frac{\left[1 + tg^2 \psi\right]^{3/2}}{tg \varphi tg \psi} \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\gamma},\tag{4}$$

где ψ – угол наклона площадки среза к минимальному главному напряжению, который в первом приближении можно принять равным $\pi/4 + \phi/2$.

Таким образом, кривизна поверхности дезинтеграции является индикатором вида напряженного состояния и его изменения в теле. Из выражения (4) следует, что постоянная кривизна (радиус) означает постоянную разность главных напряжений или одноосное напряженное состояние в каждой точке. Для идеально связных пород и материалов поверхностью дезинтеграции является плоскость. Также следует, что чем прочнее материал, тем кривизна поверхности сдвиговой дезинтеграции меньше.

С использованием вариационного принципа (3) был получен критерий укрупнения сдвиговой трещины или линейный коэффициент вложения блоков при сдвиговой дезинтеграции или фундаментальный параметр иерархии [9]. При отсутствии притока энергии извне дезинтеграция в замкнутой плоской системе может происходить только за счет накопившейся в теле энергии, при этом разрушение или появление трещины на любом масштабном (иерархическом) уровне наступает тогда, когда отношение среднего расстояния между образующимися трещинами к их среднему размеру достигает значения

$$\lambda = 4\sin\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) = 2.8_{\varphi=0}...3, 7_{\varphi=\pi/4}.$$
 (5)

Другими словами, образование трещин будет возможно только тогда, когда отношение расстояний между ними к их длине будет являться некоторой константой, продиктованной законом сохранения энергии. Данный размер межтрещинного участка необходим для накопления в нем достаточной энергии для создания плоскости дезинтеграции заданного размера. Если размер больше, то и трещина будет длиннее, конечно, в случае отсутствия рассеяния и притока энергии.

Для осредненного значения отношений размеров блоков соседних рангов, равного 3,5 по М. А. Садовскому, исходя из уравнения (5) имеем φ ≈ 32°, что достаточно точно соответствует скальному массиву. Таким образом, формула (5) может быть использована для прогнозирования угла внутреннего трения трещиноватого горного массива.

У параметра иерархии (5) появляется вполне явное и логическое толкование. Чем больше угол внутреннего трения, тем больше энергии тратится на создание новых поверхностей (структур) данных размеров, а значит, межтрещинное расстояние также возрастает. Таким образом, физический смысл критерия (5) – показатель диссипации энергии при создании поверхностей дезинтеграции. В средах, где диссипация энергии за счет внутреннего трения отсутствует, т. е. $\varphi = 0$, $\lambda = 2\sqrt{2}$, что равно удвоенному значению масштабного фактора дезинтеграции, предложенному В. Н. Опариным [10].

Помимо решения прямых геомеханических задач, выражения (1)–(5) позволяют решать обратные задачи. Действительно, в процессе отработки месторождения дезинтеграция массивов повсюду сопровождает развитие горных работ. То есть массив разрушается под действием вторичных полей напряжений (поля, измененные концентрацией – горными выработками). Из зависимости (4) следует, что не имеет значения, каковы причины возникновения поверхностей дезинтеграции, важна лишь их геометрия. Таким образом, используя принцип (3) и зависимости (4), (5) можно решать обратные задачи: по форме поверхностей сдвиговой дезинтеграции определять исходное напряженное состояние, т. е. его распределение, например, с глубиной, в случае известного естественного поля напряжений – коэффициенты концентрации напряжений или прочностные характеристики горного массива.

Заметим также, что зависимости (1)–(4) определяют закономерности дезинтеграции континуальной среды, однако необходимо четко понимать, что блочная среда (горный массив) в первоначальном виде являлась сплошной, поэтому для выявления закономерностей ее поведения как блочной среды необходимо располагать закономерностями ее генеза, т. е. дезинтеграции. Примером является критерий (5), определяющий параметр вложения блочного массива, но полученный из критериев дезинтеграции сплошной среды (1)–(4).

Таким образом, геомеханика, являясь технической наукой, имеет ряд специфических черт, кардинально отличающих ее от других инженерных наук. По-видимому, эти специфические особенности и проблемность некоторых геомеханических, геодинамических, геологических, геофизических и сейсмологических вопросов и являются причиной того, что профессия горняка по сей день является самой опасной, особенно в условиях постоянного роста глубины ведения горных работ. И действительно, глубина ведения горных работ сегодня достигает свыше 4 км, в этом случае гравитационная составляющая напряжений с учетом объемного веса пород и коэффициента концентрации будет иметь значение около 300–400 МПа, что примерно соответствует прочности на одноосное сжатие самой прочной из существующей скальной породы. Излишне даже упоминать о величине накопленной в таком горном массиве потенциальной энергии,

особенно в условиях тектонических полей напряжений, а ведь горные работы подразумевают механическое воздействие на этот массив (бурение, взрывание и т. д.). То есть работа фактически незащищенного человека (шахтера) в непосредственной близости от перенапряженного, как струна, массива в принципе не может быть безопасной. О точности прогноза безопасности ведения горных работ можно судить из ранее приведенных обсуждений, в связи с этим становится справедливым и понятным известное изречение, что «горное дело» – это вовсе не дело, а «горное искусство».

Итак, имеющиеся проблемы геомеханики сводятся, по сути, к одной фундаментальной – отсутствие достаточно обоснованных физических представлений о явлениях, происходящих в блочных средах и их закономерностях, и, как следствие, математического аппарата описания поведения трещиноватых горных массивов под нагрузкой.

«Красной нитью» в вопросах физической мезомеханики, геотектоники, сейсмологии, геофизике и др. прослеживается тезис о вихревом протекании процессов пластического деформирования и разрушения материалов и горных пород, ротационном характере движения тектонических плит, волновом характере перераспределения напряжений в массиве, волнах крутильной поляризации, нелинейных волнах маятникового типа, распространении и перераспределении энергии деформационного процесса в виде медленных деформационных или тектонических волн и движений и т. д. Другими словами, процесс деструкции, перераспределения напряжений и волновые процессы протекают в виде трансляционного смещения структурных элементов и их разворота, т. е. по схеме сдвиг + поворот [11–20].

В последние годы все большее применение в различных областях науки находит так называемое уравнение sin-Гордона или Клейна–Гордона [12, 15, 16]. Его использование в сейсмологии и геомеханике объясняется тем, что оно имеет решения в виде кинков, бризеров, уединенных волн (солитонов), быстрых и медленных кноидальных волн и каждому из них соответствует свой ход эволюции системы блоков и разломов. Кроме того, солитон sin-Гордона может останавливаться без изменения своей топологии и вновь приходить в движение. Но самое главное существование такого рода волн в горном массиве, описываемых уравнением sin-Гордона, подтверждается экспериментальными геофизическими исследованиями [12].

Главной проблемой при создании моделей деформирования блочной среды с использованием уравнения sin-Гордона является отсутствие физической интерпретации появления собственного момента силы геоблоков (спина). Согласно исследованиям А. В. Викулина [13, 14] по геотектонике, момент силы связан с вращением Земли. Исследователями [15, 16] данный момент вводится посредством привлечения несимметричного тензора напряжений (механика Коссера). Впрочем, такой подход достаточно категорично критикуется в работе [13], указывается на бездоказанность использования несимметричного тензора в рамках теории упругости, на отсутствие физического смысла моментной теории упругости с термодинамической позиции, а также на неуравновешенность кинетического момента всего тела и т. д. В работе [11] указывается, что на сегодняшний день ввиду отсутствия данных о природе собственного момента блоков чисто феноменологически его можно рассматривать как произведение касательного напряжения на длину площадки сдвига.

В рамках проведенных исследований по созданию теории устойчивости откосов как континуальной среды по методу предельного равновесия [21] можно показать, что на стадии пластического деформирования материалов, т. е. при сдвиге по трещине (микротрещине) возникает активный момент силы, равный

$$M = (\tau - \operatorname{tg} \varphi \, \sigma_{n} - C) l \cos \varphi \, r \sin(\vartheta - \varphi), \tag{6}$$

где l, r – длина площадки среза и радиус (средний) блока соответственно; ϑ – угол наклона площадки к выбранной оси. Если рассматривать горный массив как среду, на макроуровне в которой происходит пластическое течение (межблоковые подвижки), а на микроуровне (в структурном блоке) сохраняется упругая связь, т. е. линейная связь между моментом силы и кривизной граней блоков [16], то уравнение поведения дефрагментированной среды с учетом (6) и плоской задачи (двумерный случай) будет иметь вид:

$$I\frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} - A\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} - B\frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} = \left(\tau - \operatorname{tg} \, \varphi \sigma_n - C\right) l \cos \varphi r \sin\left(\theta - \varphi\right),\tag{7}$$

где A, B – упруго-геометрические постоянные; I – момент инерции геоблока.

Уравнение (7) представляет собой уравнение sin-Гордона и имеет ряд решений содержащих, в том числе, медленные волны. Выводы

Таким образом, с использованием уравнений (1)–(7) появляется возможность прогнозирования поведения горного массива на стадиях пластического деформирования и разрушения как континуальной, так и иерархически блочной среды.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Кочарян Г. Г. Деформационные процессы в массивах горных пород. М.: МФТИ, 2009. 378 с.
- 2. Сашурин А. Д. Современные геодинамические движения и их роль в формировании напряженно-деформированного состояния массива горных пород // Геомеханика в горном деле: докл. Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием (4–5 июня 2014 г.). Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2014. С. 3–12.
- 3. Балек А. Е. Учет мозаичности напряженно-деформированного состояния массивов скальных горных пород при решении практических задач недропользования // Проблемы недропользования. Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2018. Вып. 3. С. 140–150.
- 4. Зотеев О. В. Научные основы расчета конструктивных параметров систем подземной разработки руд с учетом структуры массива и порядка ведения горных работ: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Екатеринбург, 1999. 44 с.
- 5. Жабко А. В. О проблемах и современных методах оценки устойчивости откосов на открытых горных работах // Проблемы недропользования. Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2018. Вып. 3. С. 96–107.

- 6. Coulomb A. Essay on the application of the rules of maxima and minima to certain statics problems relavant to architecture. *Memoires presentes a l'Academie*. Paris: Academy of Science, 1773. P. 343–384.
- 7. Жабко А. В. Законы пластического деформирования и деструкции твердых тел // Изв. УГГУ. 2017. № 2 (46). С. 82–87. https://doi.org. 10.21440/2307-2091-2017-2-82-87
- 8. Жабко А. В. Прочность континуума (твердых тел) // Изв. вузов. Горный журнал. 2017. № 4. С. 47–55. URL: https://elibrary.ru/item. asp?id=29299923
- 9. Жабко А. В. Теоретические и экспериментальные аспекты пластического деформирования и разрушения горных пород // Изв. УГГУ. 2018. № 1 (49). С. 68–79. https://doi.org/10.21440/2307-2091-2018-1-68-79
- 10. Опарин В. Н., Курленя М. В. О скоростном разрезе земли по Гутенбергу и возможном его геомеханическом объяснении. Ч. І. Зональная геодезинтеграция и иерархический ряд геоблоков // ФТПРПИ. 1994. № 2. С. 14—26.
- 11. Макаров П. В. Подход физической мезомеханики к моделированию процессов деформации и разрушения // Физическая мезомеханика. 1998. Т. 1. № 1. С. 61–81. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=12913615
- 12. Быков В. Г. Нелинейные волны и солитоны в моделях разломно-блоковых геологических сред // Геология и геофизика. 2015. Т. 56, № 5. С. 1008–1024. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=23527753
- 13. Викулин А. В., Иванчин А. Г. О современной концепции блочно-иерархического строения геосреды и некоторых ее следствиях в области наук о Земле // ФТПРПИ. 2013. № 3. С. 67–84. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=19404459
- 14. Викулин А. В., Махмудов Х. Ф., Иванчин А. Г., Герус А. И., Долгая А. А. О волновых и реидных свойствах земной коры // Физика твердого тела. 2016. Т. 58. № 3. С. 547–557. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=25668922
- 15. Гарагаш И. А. Уединенные тектонические волны в верхней мантии // Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле: Четвертая тектонофизич, конф. ИФЗ РАН, 2016. С. 456–460.
- 16. Гарагаш И. А., Николаевский В. Н. Механика Коссера для наук о Земле // Вычислительная механика сплошных сред. 2009. Т. 2, № 4. С. 44–66. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=16355033
- 17. Панин В. Е. Основы фи́зической мезомеханики // Физическая мезомеханика. 1998. Т. 1. № 1. С. 5–22. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=12913611
- 18. Панин В. Е., Гриняев Ю. В., Псахье С. Г. Физическая мезомеханика: достижения за два десятилетия развития, проблемы и перспективы // Физическая мезомеханика. 2004. Т. 7. S1-1. C. 25–40. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=10365838
- 19. Курленя М. В., Опарин В. Н. Проблемы нелинейной геомеханики. Ч. I // ФТПРПИ. 1999. № 3. С. 12–26. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=14947953
- 20. Курленя М. В., Опарин В. Н. Проблемы нелинейной геомеханики. Ч. II // ФТПРПИ. 2000. № 4. С. 3–26. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=14954392
- 21. Жабко А. В. Аналитическая геомеханика. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2016. 224 с.

Статья поступила в редакцию 16 июля 2018 г.

УДК 622.83

Underlying problems of practical geomechanics and possible ways to overcome them

Andrey Viktorovich ZHABKO*

Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia

Relevance of the research is due to the fact that there are some problems in geomechanics associated with the incorrect presentation of the mountain mass by the continuum environment. In this regard, some fundamental problems may occur in determining the strength and deformation properties of mountain ranges, the calculation of their stress-strain behavior.

Purpose of the study is to summarize the existing problems of geomechanics, determination the most significant ones, as well as to discuss possible ways to overcome them.

Methods of the study. Analytical methods of the research with experimental verification of the specified results are used in this work.

Results and their application. This paper is intended to propose analytical criteria for plasticity and strength for rocks and other artificial materials, as well as the function of plastic potential for the strike-slip character of plastic deformation and destruction, based on the representation of solid bodies as the continuum environment. The proposed criteria and function of plastic potential were compared and adjusted with some experimental studies on the destruction of mountain rocks in a complex stress pattern. A variational principle of the disintegration of mountain ranges is proposed, which makes it possible to determine the geometry of the surfaces of disintegration. It follows that the surface of disintegration minimizes areas (volumes) with reduced potential (plastic), and areas with increased potential (elastic, energy-intensive ones) increase while minimizing the energy spent on creating surfaces (their length). On the basis of this principle, dependence has occurred; it connects the radius of curvature of the surface of shear disintegration and the main stresses while destruction by body forces (for example, gravity). A criterion for a crack extension or a fundamental hierarchy parameter (linear factor of blocks) is proposed; it is established that its value is determined by the angle of shearing resistance, as a measure for energy dissipation during when shearing. When considering a mountain massif as a discretic block medium, the sine-Gordon equation was obtained, which describes the deformation dynamics.

Conclusions. According to the results of the research, a number of criteria, principles, and dependencies were proposed that determine the processes of plastic deformation and destruction (disintegration) of rocks based on continuum and block-hierarchical models of the mountain massif.

Keywords: problems of geomechanics, strength and deformation properties of mountain ranges, disintegration and destruction of rocks, plastic deformation, sin-Gordon equation.

REFERENCES

- 1. Kocharyan G. G. 2009, Deformatsionnyye protsessy v massivakh gornykh porod [Deformation processes in rock masses]. Moscow, 378 p.
- 2. Sashurin A. D. 2014, Sovremennyye geodinamicheskiye dvizheniya i ikh rol'v formirovaniinapryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya massiva gornykh porod [Modern geodynamic movements and their role in the formation of the stress-strain behaviour of the rock mass]. Geomechanics in mining: proceedings of the All-Russian scentific and technical conference with international participation, June 4–5, pp. 3–12.
- 3. Balek A. E. 2018, Consideration of the mosaic structure of the stress-strain behavior of massive rock mass in solving practical problems of subsoil use. *Problemy nedropol'zovaniya* [Issues of subsoil use], issue 3. Ekaterinburg, pp. 140–150. (*In Russ.*)
- 4. Zoteev O. V. 1999, Scientific basis for calculating the design parameters of underground ore mining systems, taking into account the structure of the massif and the order of mining operations. PhD thesis. Ekaterinburg, 44 p.
- 5. Zhabko A. V. 2018, About the problems and modern methods for assessing the sustainability of open cast mining. *Problemy nedropol'zovaniya* [Issues of subsoil use], issue 3, Ekaterinburg, pp. 96–107. (*In Russ.*)
- 6. Coulomb A. 1773, Essay on the application of the rules of maxima and minima to certain statics problems relavant to architecture. *Memoires presentes a l'Academie*. Paris: Academy of Science, pp. 343–384.
- 7. Zhabko A. V. 2017, Laws of plastic deformation and destruction of solids. *Izvestiya UGGU* [News of the Ural State Mining University], no. 2 (46), pp. 82–87. (*In Russ.*) https://doi.org/10.21440/2307-2091-2017-2-82-87
- 8. Zhabko A. V. 2017, The strength of the continuum (of solid bodies). *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal* [News of the Higher Institutions. Mining Journal], no. 4, pp. 47–55. (*In Russ.*) URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=29299923
- 9. Zhabko A. V. 2018, Theoretical and experimental aspects of plastic deformation and destruction of rocks. *Izvestiya UGGU* [News of the Ural State Mining University], no. 1 (49), pp. 68–79. (*In Russ.*) https://doi.org/10.21440/2307-2091-2018-1-68-79
- 10. Oparin V. N., Kurlenya M. V. 1994, About the velocity profile of the earth according to Guttenberg and a possible geo-mechanical explanation. Part I. Zonal geo-disruption and hierarchical row of geo-blocks. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh* [Journal of Mining Science], no. 2, pp. 14–26. (*In Russ.*)
- 11. Makarov P. V. 1998, Physical mesomechanics approach to modeling the processes of deformation and fracture. Fizicheskaya mezomekhanika [Physical mesomechanics], no. 1, pp. 61–81. (*In Russ.*) URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=12913615
- 12. Bykov V. G. 2015, Nonlinear waves and soliton waves in fault block models of geological terrains. *Geologiya i geofizika* [Geology and Geophysics], Vol. 56, No 5, pp. 1008-1024. (In Russ.) URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=23527753
- 13. Vikulin A. V., Ivanchin A., G. 2013, About the modern concept of the block-hierarchical structure of the geological terrain and some of its consequences in the Earth sciences. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh* [Journal of Mining Science], No 3, pp. 67-84. (In Russ.) URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=19404459
- 14. Vikulin A. V., Makhmudov Kh. F., İvanchin A. G. et al. 2016, On wave and rheidity properties of the Earth's crust. Fizika tverdogo tela [Physics of the Solid State], vol. 58, issue 3, pp. 547–557. (In Russ.) URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=25668922
- 15. Garagash I. A. 2016, *Uyedinennyye tektonicheskiye volny v verkhney mantii* [Solitary tectonic waves in the upper mantle]. *Tectonophysics and current issues of Earth sciences. The fourth tectonic-physical conference of The Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences*, pp. 456–460. (*In Russ.*)
- 16. Garagash I. A., Nikolaevsky V. N. 2009, Cosserat mechanics for the Earth Sciences. *Vychislitel'naya mekhanika sploshnykh sred* [Computational Continuum Mechanics], vol. 2, no. 4, pp. 44–66. (*In Russ.*) URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=16355033
- ^{*}⊠ zhabkoav@mail.ru
- https://orcid.org/0000-0002-3081-9522

A. V. Zhabko / News of the Ural State Mining University. 2018. Issue 4(52), pp. 98-107

- **ENGINEERING SCIENCES**
- 17. Panin V. E. 1998, Fundamentals of physical mesomechanics. *Fizicheskaya mezomekhanika* [Physical mesomechanics], no. 1, pp. 5–22. (*In Russ.*) URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=12913611
- 18. Panin V. E., Grinyaev Yu. V., Psakhie S. G. 2004, Physical mesomechanics: advances for two decades of development, problems and prospects. *Fizicheskaya mezomekhanika* [Physical mesomechanics], vol. 7, issue S1-1, pp. 1–25. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=10365838 19. Kurlenya M. V., Oparin V. N. 1999, Problems of nonlinear geomechanics. Part I. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh* [Journal of Mining Science], no. 3, pp. 12–26. (*In Russ.*) URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=14947953
- 20. Kurlenya M. V., Oparin V. N. 2000, Problems of nonlinear geomechanics. Part II. Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh [Journal of Mining Science], no. 4, pp. 3–26. (In Russ.) URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=14954392
- 21. Zhabko A. V. 2016, Analiticheskaya geomekhanika [Analytical geomechanics]. Ekaterinburg, 224 p.

The article was received on July 16, 2018

УДК 621.671.22

Способ борьбы с твердой фазой шахтных вод путем полезного использования избыточной напорности насосного оборудования

Николай Петрович ОВЧИННИКОВ*

Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова, Россия, Республика Саха (Якутия), Якутск

Актуальность работы. Шахтная вода, откачиваемая из горных выработок подземных кимберлитовых рудников Российской Федерации, находящихся в ведении компании АК «АЛРОСА» (ПАО), является высокоминерализованной натурной жидкостью, в связи с чем она обладает плотностью, превосходящей плотность чистой водопроводной воды в 1,2—1,4 раза. Для откачки такой натурной жидкости на названных рудниках используют секционные насосы с избыточной напорностью, что исключает их работу в режиме перегрузки — нежелательном рабочем режиме с точки зрения эксплуатации. На ряде водоотливных установок подземных кимберлитовых рудников напорность эксплуатируемых секционных насосов превышает расчетный полный напор более чем в 1,7 раза. Завышенный запас избыточной напорности данных рудничных водоотливных установок снижает эффективность их эксплуатации вследствие непроизводительных затрат на электроэнергию, из-за этого полезное использование избыточной напорности их секционных насосов представляет собой востребованную научно-практическую задачу.

Шель работы. Настоящая работа посвящена разработке и научному обоснованию технического решения, направленного на борьбу с твердой фазой шахтных вод, откачиваемых из водосборников подземных кимберлитовых рудников Российской Федерации, путем полезного использования избыточной напорности используемого насосного оборудования.

Методы исследования. Для достижения поставленной цели использовался комплексный подход, включающий в себя: анализ различных литературных источников по тематике исследования, анализ значительного практического материала по работе насосного оборудования подземных кимберлитовых рудников Российской Федерации, аналитические расчеты, экспериментальные исследования на лабораторной насосной установке на базе центробежного насоса модели К8/18.

Результаты. На основании выполненных автором научных исследований было предложено техническое решение, направленное на борьбу с твердой фазой шахтных вод, поступаемых в водосборники подземных кимберлитовых рудников Российской Федерации. Данное техническое решение защищено патентом на изобретение Российской Федерации.

*Ключевые слов*а: шахтная вода, подземный кимберлитовый рудник, секционные насосы, избыточная напорность, шлам, устройство для взмучивания шлама, подпор, гидроциклон.

ведение. Постановка задачи

Шахтная вода, откачиваемая из горных выработок подземных кимберлитовых рудников России, обладает плотностью, превосходящей в 1,2–1,4 раза плотность чистой воды [1–4].

Для откачки такой натурной жидкости на подземных кимберлитовых рудниках Российской Федерации, находящихся в ведении компании АК «АЛРОСА» (ПАО), используют секционные насосы с избыточной напорностью, что исключает их работу в режиме перегрузки – нежелательном рабочем режиме с точки зрения эксплуатации.

Ранее проведенные автором исследования свидетельствуют, что применительно к условиям подземных кимберлитовых рудников России секционные насосы считаются оптимально подобранными, когда их напорность превышает расчетный полный напор в 1,5–1,7 раза [3].

Однако на нескольких водоотливных установках указанных рудников напорность эксплуатируемых секционных насосов превышает расчетный полный напор более чем в 1,7 раза [3]. Работа такого насосного оборудования определенно влечет за собой значительные непроизводительные затраты на электроэнергию.

Исходя из всего изложенного, констатируем, что снижение избыточной напорности секционных насосов до оптимальных значений или ее полезное использование позволит повысить эффективность эксплуатации ряда водоотливных установок подземных кимберлитовых рудников Российской Федерации.

Краткий анализ работ по тематике исследования

Анализ различных источников показал, что снижения или полезного использования избыточной напорности насосного оборудования можно добиться различными путями [5–9].

На производстве одним из распространенных методов борьбы с избыточной напорностью насосного оборудования до сих пор является дросселирование задвижкой на нагнетательном трубопроводе. Данный метод обеспечивает снижение нагрузки на электродвигатель, однако в тоже время у насоса значительно снижается КПД [5].

В работах [6, 8] отмечается, что избыточная напорность насоса может значительно быть снижена путем впуска воздуха в его всасывающий патрубок. Серьезным минусом этого способа является то, что он может способствовать интенсивному развитию кавитационных процессов в насосе, негативно влияющих на его работоспособность.

Для снижения избыточной напорности насосного оборудования был рассмотрен вариант с использованием преобразователей частоты [5–8]. Как выяснилось, снижение избыточной напорности насосного оборудования до оптимальных значений путем изменения частоты вращения сопряжено со снижением его производительности, что в ряде случаев недопустимо. К примеру, некоторые рудничные водоотливные установки практически бесперебойно работают по схеме «один насос в работе, один насос в резерве, один насос в ремонте». В случае принудительного снижения производительности насоса из-за использования преобразователя частоты в работу дополнительно включается насос, ранее находящийся в резерве. Таким образом, водоотливная установка остается без резерва, что создает аварийную ситуацию.

В работе [9] избыточную напорность насосного оборудования предлагается использовать в качестве генератора высоконапорной струи гидроэлеваторной установки. Реализация такого технического решения может привести к повы-

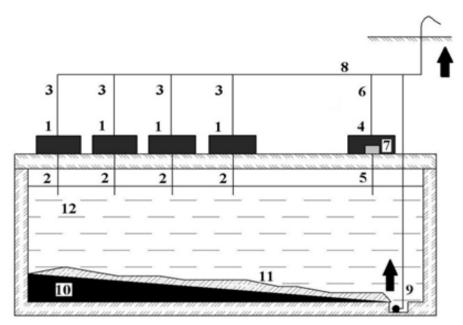


Рисунок 1. Гидромеханизированный комплекс рудничного водоотлива. 1 — секционные насосы; 2, 3 — всасывающие и напорные трубопроводы; 4 — секционный насос; 5, 6 — всасывающие и напорные трубопроводы; 7 — гидроциклон; 8 — общий напорный коллектор; 9 — устройство для взмучивания шлама; 10 — параллельные наклонные пластины; 11 — шлам; 12 — зумпф водосборника.

Figure 1. Hydromechanized mine drainage complex. 1 – stage chamber pumps; 2, 3 – intake and pressure pipelines; 4 – stage chamber pump; 5, 6 – intake and pressure pipelines; 7 – cyclone; 8 – general discharge header; 9 – device for spreading sludge; 10 – parallel inclined plates; 11 – sludge; 12 – drain sump of water-collecting header.

шению числа отказов насосов, так как полезное использование их избыточной напорности сопряжено со значительным повышением нагрузки гидравлической природы на их уплотнительные элементы со стороны всасывания.

Предлагаемое техническое решение

Для повышения эффективности эксплуатации ряда водоотливных установок подземных кимберлитовых рудников России сотрудниками Горного института Северо-Восточного федерального университета им. М. К. Аммосова было предложено техническое решение (рис. 1), позволяющее полезно использовать избыточную напорность насосного оборудования в целях борьбы со шламом – твердой фазой откачиваемой шахтной воды. Стоит отметить, что устройство и способ работы данного технического решения защищены патентом на изобретение Российской Федерации [10].

Гидромеханизированный комплекс рудничного водоотлива работает следующим образом.

Поступающая в зумпф водосборника 12 шахтная вода предварительно осветляется за счет оседания на наклонных пластинах 10 шлама11, входящего в состав воды, с последующим его перемещением в специальную канаву, где установлено устройство для взмучивания шлама 9.

Устройство для взмучивания шлама 9 обеспечивает поднятие шламового облака на поверхность зумпфа водосборника 2, которое под действием центробежных сил разделяется в гидроциклоне 7, установленном на всасывающем трубопроводе 5 секционного насоса 4, на жидкую и твердую составляющие с последующим удалением последней. Устройство для взмучивания шлама 9 состоит из двух трубопроводов. Один трубопровод врезан в общий напорный коллектор 8, обеспечивающий необходимый подпор для поднятия шламового облака, и опущен на дно зумпфа водосборника 12, где соединен со вторым трубопроводом, представляющим собой трубу прямого действия, закрытую с обоих торцов, с врезанными в одну из ее боковых стенок соплами, направленными вверх.

Секционные насосы 1 на вышележащий горизонт или дневную поверхность уже откачивают осветленную шахтную воду. Необходимый подпор для поднятия шламового облака обеспечивает давление общего напорного коллектора 8, в который врезан один из двух трубопроводов устройства для взмучивания шлама 9.

Таким образом, видно, что избыточная напорность секционных насосов 1 используется для создания подпора, необходимого для поднятия шламового облака на поверхность зумпфа водосборника 12.

Научное обоснование предлагаемого технического решения

В предлагаемом техническом решении гидроциклон является напорным. Для обеспечения положительного давления на входе в гидроциклон необходимо выполнить следующее условие:

$$h > H_{\text{\tiny Bak}}$$
,

где h – подпор, необходимый для поднятия шламового облака, м; $H_{_{\rm вак}}$ – фактическая вакуумметрическая высота всасывания секционного насосам, м (рис. 1, поз. 4).

В нашем случае фактическая вакуумметрическая высота всасывания секционного насоса равна:

$$H_{\text{\tiny BAK}} = H_1 + H_2 + H_3 + H_4 + H_5$$

где H_1 – геометрическая высота всасывания секционного насоса, м; H_2 – высота от оси сливного патрубка гидроци-

клона, м (рис. 1, поз. 5) до оси всасывающего трубопровода секционного насоса; H_3 – потери напора во всасывающем трубопроводе секционного насоса, м; H_4 – динамический напор во всасывающем трубопроводе секционного насоса, м; H_5 – потери напора в гидроциклоне, м.

Величину H_{A} находим по следующей формуле, Π а:

$$H_{5} = \rho v^{2}/2$$
.

где ρ – плотность жидкости, кг/м³; v – скорость жидкости во всасывающем трубопроводе, м/с.

Обычно в расчетах величина H_1 составляет 2–5 м (принимаем 4 м). Исходя из того, что шахтный водоприток в водосборники участковых водоотливных установок подземных кимберлитовых рудников с избыточной напорностью насосного оборудования не превышает 300 м³/ч, а средняя концентрация механических примесей в воде составляет 20 г/л, то для осветления такой воды подойдет напорный гидроциклон малой производительности.

Например, максимальная величина H_2 для напорных гидроциклонов с производительностью до 50 м³/ч составляет 1 м. Величина H_2 обычно не превышает 0,5 м, а H_4 – 2600 Па или 0,265 м (при условии, что $\rho = 1300$ кг/м³; v = 2 м/с).

Экспериментальные исследования, выполненные на лабораторной насосной установке (рис. 2), показали, что при работе с гидроциклоном, установленным на всасывающей линии насоса-имитатора (модель K8-18), отрицательное давление на входе последнего снизилось на 25 %.

Таким образом,

$$H_{\text{\tiny BAK}} = 1,25 (H_1 + H_2 + H_3 + H_4), \tag{1}$$

Тогда:

Минимальное давление на входе в гидроциклон производительностью до $50 \text{ m}^3/\text{ч}$ составляет $0.03 \text{ M}\Pi \text{a} (3 \text{ m})^1$.

С учетом обязательного коэффициента запаса (принимаем 0,5) и расстояния от устройства для взмучивания шлама до всасывающей линии секционного насоса (принимаем 1,3 м)минимально допустимый подпор h_{\min} , необходимый для поднятия шламового облака, в нашем случае должен составлять 12 м.

Не стоит забывать, что создание и рост подпора h непременно связаны со снижением гидравлических параметров насосного оборудования. Чрезмерное снижение подачи Q и напора H секционных насосов может привести к их работе с критическим осевым смещением ротора, т. е. к работе в аварийных режимах.

Проведенные автором экспериментальные исследования на уже известной нам лабораторной насосной установке (рис. 3) позволили установить эмпирические формулы, выведенные с помощью аппроксимации линейных зависимостей (рис. 4, *a*, *б*), благодаря которым можно рассчитать оптимальный для поднятия шламового облака подпор с точки зрения безопасного функционирования водоотливной установки.

Рассмотрим реализацию предлагаемого технического решения на примере участковой водоотливной установки УНС-310 подземного кимберлитового рудника «Мир».

Исходные данные водоотливной установки: средняя производительность $Q-360 \text{ м}^3/\text{ч}$; средний напор H-227,5 м.



Рисунок 2. Работа насоса-имитатора с установленным на всасывающей линии гидроциклоном в лабораторных условиях. Figure 2. The operation of the simulator pump with a cyclone installed in the suction line in laboratory setting.

¹ Гидроциклоны. Технические условия 1104-022-05773333-2008. URL: http://pzgo.ru/uploadedFiles/files/TU_1104-022-05773333-2008_Gidrociklon.pdf

¹¹⁰ Овчинников Н. П. Способ борьбы с твердой фазой шахтных вод путем полезного использования избыточной напорности насосного оборудования // Известия УГГУ. 2018. Вып. 4(52). С. 108-113. DOI 10.21440/2307-2091-2018-4-108-113



Рисунок 3. Работа насоса-имитатора с установленным на напорной линии устройством для взмучивания шлама в лабораторных условиях.

Figure 3. The operation of the simulator pump with a device installed on the pressure line for spreading sludge in laboratory setting.

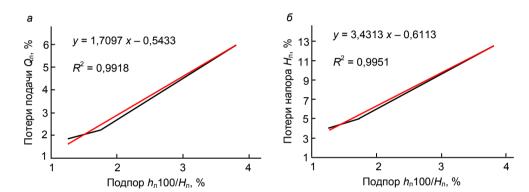


Рисунок 4. Линейные зависимости потерь подачи – a и напора – b насоса-имитатора от создаваемого подпора. Figure 4. Linear dependences of supply losses – b and pressure – b of the pump-simulator from the created backwater.

Как было отмечено ранее, минимальный подпор h_{\min} для поднятия шлама равен 12 м, что составляет 5,3 % от напора водоотливной установки УНС-310.Проверим, является ли такой подпор оптимальным с точки зрения безопасности функционирования рассматриваемой водоотливной установки.

Согласно выведенным эмпирическим формулам (рис. 4, a, δ), водоотливная установка УНС-310 обеспечивает подпор, равный 12 м, при условии снижения подачи Q на 8,5 % и напора H на 17,6 %, что вполне приемлемо, так как предельное снижение подачи варьируется в диапазоне 20-30 %(производственные данные), а максимальное снижение напора данной водоотливной установки до оптимальных значений составляет 20 % (расчетные данные).

Исходя из основ теории подобия, такие потери гидравлических параметров водоотливной установки УНС-310 возможны в случае длины горизонтальной трубы устройства для взмучивания шлама, равной 1,6 м, и внутреннего диаметра сопел, равного 0,08 м, расстояние между центрами которых составляет 0,16 м:

$$\frac{H_{n}}{l_{n}} = \frac{H}{l} \Rightarrow \frac{21.6}{0.15} = \frac{227.5}{1.6}; \quad \frac{l_{n}}{d_{n}} = \frac{l}{d} \Rightarrow \frac{0.15}{0.008} = \frac{1.5}{0.08}; \quad \frac{d_{n}}{d_{n}} = \frac{d}{a} \Rightarrow \frac{0.008}{0.016} = \frac{0.08}{0.16}.$$

где $H_{_{\rm n}}, H$ – номинальный напор лабораторной насосной установки и водоотливной установки; $l_{_{\rm n}}, l$ – длина трубы устройства для взмучивания шлама лабораторной насосной установки и водоотливной установки; $d_{_{\rm n}}, d$ – внутренний диаметр сопел трубы устройства для взмучивания шлама лабораторной насосной установки и водоотливной установки; $a_{_{\rm n}}, a$ – расстояние между центрами сопел трубы устройства для взмучивания шлама лабораторной насосной установки и водоотливной установки.

Так как длина горизонтальной трубы устройства для взмучивания шлама будет заведомо больше диаметра сетчатого фильтра, установленного на всасывающей линии насоса, то далеко не вся поднятая устройством пульпа (~ 35 м³/ч) поступит в насос. Учитывая это, можно предположить, что производительность по питанию гидроциклона составит около 15–20 м³/ч. Такую производительность по питанию при давлении 0,03 МПа (3 м) может обеспечить напорный гидроциклон модели ГЦ-250. Исходя из модели гидроциклона, в качестве насоса можно использовать насос модели ЦНС(К) 13-280.

Выводы

В ходе проведенных научных исследований было разработано и научно обосновано техническое решение, направленное на повышение эффективности эксплуатации ряда водоотливных установок подземных кимберлитовых рудников Российской Федерации, обладающих избыточной напорностью. Стоит отметить, что предложенный гидромеханизированный комплекс рудничного водоотлива в большей степени направлен на борьбу с заиливанием водосборников, а не с гидроабразивным изнашиванием деталей проточной части насосного оборудования, являющимся одной из основных причин его отказов [3, 4, 11–17], так как устройство для взмучивания шлама способствует сохранению взвешенных частиц в откачиваемой насосным оборудованием воде.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Дроздов А. В. Оценка возможности закачки дренажных рассолов карьера и рудника «Удачный» в среднекембрийский водоносный комплекс // Вестник ИрГТУ. 2013. № 7(78). С. 32–40. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=19959899
- 2. Дроздов А. В., Крамсков Н. П., Гензель Г. Н. Особенности гидромеханического мониторинга под водными объектами на алмазных месторождениях Западной Якутии // Вестник ИрГТУ. 2011. № 1(48). С. 72–79. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=15585929
- 3. Овчинников Н. П., Зырянов И. В. Оценка долговечности секционных насосов подземных кимберлитовых рудников АК «АЛРОСА» // Горный журнал. 2017. № 10. С. 41–44. https://doi.org/10.17580/gzh.2017.10.08
- 4. Овчинников Н. П. Проблемы эксплуатации электронасосных агрегатов секционного типа на кимберлитовых рудниках АК «АЛРОСА» и пути их решения // Изв. ТПУ. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329, № 6. С. 66–73. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=35410967
- 5. Сташинов Ю. П., Боченков Д. А., Волков В. В. Технические и энергетические аспекты применения регулируемого электропривода на главных водоотливных установках шахт // ГИАБ. 2009. № 16. С. 202–209.
- 6. Петровых Л. В., Марченко А. Ю., Иващенко Е. П., Марченко М. Ю., Салтанов С. Н., Баринов И. М., Викулов Е. А. Определение необходимой глубины регулирования водоотливных установок в условиях завышенного напора насосов // Изв. УГГУ. 2015. № 4(40). С. 62–66. URL: https://iuggu.ru/download/2015-4-Petrovykh.pdf
- 7. Тимухин С. А., Дмитриев С. В., Петровых Л. В. Оценка затрат на техническое обслуживание шахтных центробежных насосов с учетом их избыточной напорности // Изв. УГГУ. 2011. № 25/26. С. 102–104.
- 8. Косарев Н. П., Молодцов В. В., Тимухин С. А., Белов С. В., Упоров С. А., Шлейвин В. В. Пути энергосбережения на водоотливных установках шахт ОАО «Севуралбокситруда» // Изв. УГГГА. 2003. № 16. С. 41–43.
- 9. Тимухин С. А., Угольников А. В., Петровых Л. В., Стожков Д. С., Лубинский А. Ю. Шахтная водоотливная установка: пат. 2472971 Рос. Федерация; заявл. 09.06.11; опубл. 20.01.13.
- 10. Овчинников Н. П., Викулов М. А. Гидромеханизированный комплекс рудничного водоотлива: пат. 2649198 Рос. Федерация; заявл. 27.09.17; опубл. 30.03.18, Бюл. № 10.
- 11. Antoev K. P., Zarovnyaev B. N., Khristoforova A. A. An apparatus that analyzes the hydroabrasive wear of fiberglass pipes // Journal of Friction and Wear. 2017. Vol. 38, issue 3. P. 208–210. https://doi.org/10.3103/S1068366617030023
- 12. Kesler R. Considerations is selecting a positive displacement slurry pump // Mining World. 2016. Vol. 13(4). P. 34–37. URL: https://www.abel-pumps.com/en/Press/2016/MiningWorld_diaphragm_pump_slurry_pump.pdf
- 13. Patsera S., Protsiv V., Kosmin V. Feasible ways to improve the durability of the pumps' parts operating with hydroabrasive mixtures // Mechanics, Materials Science and Engineering. 2015. Vol. 1. P. 133–137. https://dx.doi.org/10.13140/RG.2.1.4039.5286
- 14. Долганов А. В. Шламы медно-колчеданных рудников: проблемы и пути решения // ГИАБ. 2013. № 4. С. 10–14.
- 15. Aleksandrov V. I., Avksentiev S. Y. Vibration-based diagnostics of slurry pump technical state // Indian journal of science and technology. 2016. Vol. 9, issue 5. P. 1–6. http://dx.doi.org/10.17485/ijst2016v9i587590
- 16. Khalid Y. A., Sapuan S. M. Wear analysis of centrifugal slurry pump impellers // Industrial lubrication and tribology. 2007. Vol. 59, issue 1. P. 18–28. https://doi.org/10.1108/00368790710723106
- 17. Walker C. I. Slurry pump side-linerwear: comparison of some laboratory and field results // Wear. 2001. Vol. 250, issue. 1. P. 81-87. http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1648(01)00613-5

Статья поступила в редакцию 29 мая 2018 г.

УДК 621.671.22

https://doi.org/10.21440/2307-2091-2018-4-108-113

The method of fighting with the solid phase of mine waters by the beneficial use of excessive pressure pumping equipment

Nikolay Petrovich OVCHINNIKOV*

M. K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia

Relevance of the work. Mine water pumped from the mine workings of the underground kimberlite mines of the Russian Federation, administered by PJSC ALROSA, is a highly mineralized natural fluid, and therefore it has a density that exceeds the density of pure tap water by 1.2–1.4 times. For pumping out such natural fluid in the mines mentioned above, sectional pumps with excessive pressure are used that excludes their operation in the overload mode — an undesirable operating mode from the operational point of view. At a number of drainage installations of underground kimberlite mines, the pressure of the used sectional pumps exceeds the predicted total head by more than 1.7 times. The excessive supply of excess pressure of these mining drainage plants reduces the efficiency of their operation due to unproductive energy costs; because of this, the beneficial use of the excessive pressure of their sectional pumps is a demanded scientific and practical task.

Purpose of the work. This paper is devoted to the development and scientific substantiation of a technical solution aimed at combating the solid phase of mine water pumped out of the water-collecting headers of the underground kimberlite mines within the Russian Federation, through the beneficial use of excessive pressure equipment used by the pump equipment.

Method of research. To achieve this goal, an integrated approach was used, including: analysis of various literature sources on the subject of research, analysis of significant practical information on the operation of pumping equipment at underground kimberlite mines of the Russian Federation, analytical calculations, and experimental studies using a laboratory pumping unit based on a K8/18 centrifugal pump.

Results. On the basis of the scientific studies carried out by the author, a technical solution was proposed aimed at fighting the solid phase of mine water entering the water-collecting headers of the underground kimberlite mines of the Russian Federation. This technical solution is protected by patent of the Russian Federation.

Keywords: mine water, underground kimberlite mine, stage chamber pump, excessive pressure, sludge, device for spreading sludge, backwater, cvclone.

REFERENCES

- 1. Drozdov A. V. 2013, Assessment of the possibility of pumping drainage brines of the open pit and the Udachny mine into the Middle Cambrian aquiferous complex. Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta [Proceedings of Irkutsk State Technical University], no. 7 (78), pp. 32-40. (In Russ.) URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=19959899
- 2. Drozdov A. V., Kramskov N. P., Hansel G. N. 2011, Features of hydromechanical monitoring under water bodies in the diamond deposits of Western Yakutia. Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta [Proceedings of Irkutsk State Technical University], no. 1 (48), pp. 72-79. (In Russ.) URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=15585929
- 3. Ovchinnikov N. P., Zyryanov I. V. 2017, Estimation of durability of stage chamber pump of the underground kimberlite mines of PJSC ALROSA.
- Gornyi Zhurnal [Mining Journal], no. 10, pp. 41–44. https://doi.org/10.17580/gzh.2017.10.08 (In Russ.)

 4. Ovchinnikov N. P. 20186 Problems of operation of electric pump units of the sectional type at the kimberlite mines of AK ALROSA and ways to solve them. Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering], vol. 329, no. 6, pp. 66-73. (In Russ.) URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=35410967
- 5. Stashinov Yu. P., Bochenkov D., Volkov V. V. 2009, Technical and energy aspects of the use of an adjustable electric drive on the main drainage installations of mines. Gorny Informatsionno-Analiticheskiy Byulleten [Mining Informational and Analytical Bulletin], no. 16, pp. 202–209. (In Russ.) 6. Petrovykh L. V., Marchenko A. Yu., Ivashchenko E. P., Marchenko M. Y., Saltanov S. N., Barinov I. M., Vikulov E. A. 2015, Determination of the required depth of regulation of drainage plants in conditions of high pump pressure. Izvestiya UGGU [News of the Ural State Mining University], no. 4 (40), pp. 62-66. URL: https://iuggu.ru/download/2015-4-Petrovykh.pdf
- 7. Timukhin S. A., Dmitriev S. V., Petrovykh L. V. 2011, Estimation of costs for maintenance of centrifugal type pumps taking into account their excessive pressure. Izvestiya UGGU [News of the State Mining University], No 25/26, pp. 102–104. (In Russ.)
- 8. Kosarev N. P., Molodtsov V. V., Timukhin S. A., Belov S. V., Uporov S. A., Shleivin V. V. 2003, Ways of energy saving at water-drainage installations of the mines of OAO "Sevuralboksitruda". *Izvestiya ural'skoy gosudarstvennoy gomo geologicheskoy akademii* [News of the Ural State Mining and Geological Academy], no. 16, pp. 41–43. (*In Russ.*)

 9. Timukhin S. A., Ugolnikov A. V., Petrovykh L. V., Stozhkov D. S., Lubinsky A. Yu. 2013, *Shakhtnaya vodootlivnaya ustanovka* [Water-drainage
- installations of the mine]. Patent RF no. 2472971.
- 10. Ovchinnikov N. P., Vikulov M. A. 2018, Gidromekhanizirovannyy kompleks rudnichnogo vodootliva [Hydromechanized complex of mine drainage]. Patent RF no. 2649198. URL: http://www.findpatent.ru/patent/264/2649198.html
- 11. Antoev K. P., Zarovnyaev B. N., Khristoforova A. A. 2017, An apparatus that analyzes the hydroabrasive wear of fiberglass pipes. Journal of Friction and Wear, vol. 38, issue 3, pp. 208-210. https://doi.org/10.3103/S1068366617030023
- 12. Kesler R. 2016, Considerations is selecting a positive displacement slurry pump. Mining World, vol. 13(4), pp. 34-37. URL: https://www.abelpumps.com/en/Press/2016/MiningWorld_diaphragm_pump_slurry_pump.pdf
- 13. Patsera S., Protsiv V., Kosmin V. 2015, Feasible ways to improve the durability of the pumps' parts operating with hydroabrasive mixtures. Mechanics, Materials Science and Engineering. Vol. 1. P. 133-137. https://dx.doi.org/10.13140/RG.2.1.4039.5286
- 14. Dolganov A. V. 2013, Sludges of copper-pyrite mines: problems and ways of their solving. Gorny Informatsionno-Analiticheskiy Byulleten [Mining Informational and Analytical Bulletin], no. 4, pp. 10–14. (In Russ.)

 15. Aleksandrov V. I., Avksentiev S. Y. 2016, Vibration-based diagnostics of slurry pump technical state. Indian journal of science and technology,
- vol. 9, issue 5, pp. 1-6. http://dx.doi.org/10.17485/ijst2016v9i587590
- 16. Khalid Y. A., Sapuan S. M. 2007, Wear analysis of centrifugal slurry pump impellers. Industrial lubrication and tribology, vol. 59, issue 1, pp. 18-28. https://doi.org/10.1108/00368790710723106
- 17. Walker C. I. 2001, Slurry pump side-linerwear: comparison of some laboratory and field results. Wear, vol. 250, issue 1, pp. 81–87. http://dx.doi. org/10.1016/S0043-1648(01)00613-5

The article was received on May 29, 2018

^{*} ⊠ ovchinnlar1986@mail.ru

https://orcid.org/0000-0002-4355-5028

Экономические науки Economic sciences

УДК 553.3.072; 071

https://doi.org/10.21440/2307-2091-2018-4-114-121

To the question about prospects (upcycle) of abandoned copper-sulphide pits in the Urals

Sfen Stepanovich KARAGODIN^{1, *}, Vladimir Sfenovich KARAGODIN^{2, **}, Yuriy Petrovich MOROZOV^{2, ***}, Ivan Vasil'evich ZAUZOLKOV^{3, ***}

¹Nedra group Ltd., Ekaterinburg, Russia ²Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia ³CJSC "NPK Ekologia", Ekaterinburg, Russia

Relevance of the topic is due to concern of modern civilized society about the negative impact on the ecology of man-made mineral formations of the mining activity.

Technogenic ores are represented by sludges, which are removed by groundwater from abandoned pits and rock dumps. They are deposited in surface watercourse and serve as a source of environmental disasters. They overfill natural and artificial sedimentation basin, and the mine waters carrying them threaten to increase acidity in protected reservoirs that serve as a source for drinking water for big cities. At the same time, in recent years, the industrial value of these sludges has been determined, and the technology has been developed for extracting non-ferrous metals and useful associated components from them. It is revealing that this ore sludge occur directly in alluvial and deluvial deposits of river valleys and ponds, which are also of industrial interest as a source of surface gold and industrial minerals – sand gravel mixes. The need for the extraction of large volumes of the latter is particularly relevant, since an extensive construction program is planned and implemented here.

The purpose of this paper is to attract attention of business and the public to an economically advantageous project for the development of manmade copper-zinc ores from the abandoned pits of the Urals with a simultaneous solution of environmental problems.

Methodology. The work was done by the authors using the results of their own research and materials in collaboration with the team of Nedra group Ltd. **The result of the work.** The authors have shown the presence of technogenic copper-zinc deposit within the territory of the Degtyarsky pit and predicted gold-bearing placers in addition to it.

Conclusions. The main task of the study in the territory of the Degtyarsky pit is granting the licenses for the sites of Istok and Elchyovka; the estimated cost of engineering design and geological exploration with an evaluation of reserves of non-ferrous, noble metals and associated raw materials in sludge and alluvium-deluvium, as well as with the solution of environmental problems, ranges from 50–60 to 80 million rubles.

Keywords: technogenic and complex deposit, copper-zinc ores, alluvial gold, industrial minerals, economics, ecology.

Introduction
Mining activity generates a large amount of mine waste, which accumulates in unwanted artificial man-made waste heaps and sludge storages [1, 2, etc.]. One of the most extensive mining activities is copper mining. Copper is a metal that has been important to humanity since ancient times and is the third largest metal in the world after iron and aluminum. The undesirable effect of such mining operations is especially enhanced in the case of mining by the shaft method since the minerals that make up copper ore contain sulfur in large quantities, which forms an acid when dissolving in water. Therefore, acidic mine waters, adversely affecting plants and the animal world, engender one of the most significant environmental problems and are the main source of water pollution worldwide [3–5].

Sludges of abandoned copper-pyrite pits of the Urals (Degtyarsky, Levikhinsky, Gumeshevsky, Verkhne-Pyshminsky, Zyuzelsky and other smaller ones – 14 pits in the Middle Urals in total) that carried out by underground and surface waters from idle mines and dumps accumulate in the surface watercourse overflowing them and threatening the environmental safety of adjacent territories (Fig. 1) [6–8, https://uraloved.ru/goroda-i-sela/sverdlovskaya-obl/gorod-degtyarsk].

Technogenic lead-zinc deposit of the Degtyarsky pit

At the same time, in recent years, some sources exploring sludge of the Degtyarsky copper-sulphide pit, one of the largest in the world [9, 10, etc.], show the commercial value of the marketable output produced from sludge: copper, zinc, ferrum and oxide coloring agent and quartz-sulphide cake containing gold, silver and rare earth metals, as well as industrial mineral – gypsum (Bukharov A. N. 2013, *Tekhniko-ekonomicheskoye obosnovaniye investitsionnogo proyekta «Opytno-promyshlennoye predpriyatiye po kompleksnoy pererabotke ilov pruda-otstoynika otrabotannogo Degtyarskogo mednogo rudnika s polucheniyem tovarnoy produktsii* [Feasibility study of the investment project "Experimental-industrial enterprise for integrated processing of sludge from the treatment pond of the abandoned Degtyarsky copper pit to produce marketable products". Ekaterinburg, 22 p.) (Table 1).

*

sfen80k@mail.ru

*

sfen80k@mail.ru

https://orcid.org/0000-0002-5882-821X

**karagodinDEC@yandex.ru

*** tails2002@inbox.ru

**** ecolnpk@mail.ru



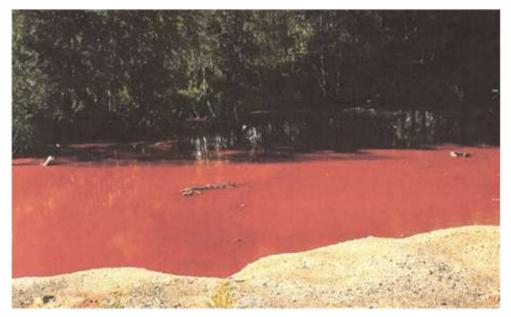


Figure 1. Woeful spectacle of the valley of the Istok river containing slimes of the Degtyarsky pit (source: uralmines.ru).
Рисунок 1. Удручающие виды современного состояния долины р. Исток, вмещающей шламы Дегтярского рудника (источник: uralmines.ru).

The concentrations in these man-made ores of copper – 1.5% and zinc – 5.5% are illustratory (whereas the copper content was 0.9–1.26%, and zinc, 1.38–2.7 % [9] in ledge ores using shaft method), as well as the presence of a highly profitable technology for extracting valuable elements from sludge developed by CISC "NPK Ekologia".

Within the territory of the Degtyarsky pit, the predicted resources of technogenic ore (sludge) of category P_2 in the valley of the Istok river can be expertly taken in the amount of 1.3 million tons; category P_1 in the Elchevsky teatment pond – 1.1 million tons. In general, the estimated resources of sludge in the Degtyarsky pit of categories $P_1 + P_2$ will amount to 2.4 million tons. In

Table 1. The chemical composition and volume of sludge in the licensed areas of the Degtyarsky pit. Таблица 1. Химический состав и объемы шлама на лицензионных участках Дегтярского рудника.

No	Element	Average grade in dry ore, %	Reserves, tons
1	Copper	1.5	6000
2	Zink	5.5	22 000
3	Ferrum	20	80 000
4	Manganese	2.9	1100
5	Cementitious residue (gypsum)	70	280 000

Table 2. The volume and cost of stocks of the main raw materials extracted at the licensed sites of the Degtyarsky pit according to the technology developed by CJSC "NPK Ekologia".

Таблица 2. Объем и стоимость запасов основного сырья, извлекаемых на лицензионных участках Дегтярского рудника по разработанной «НПК Экология» технологии.

Elements	Recoverable quantities, tons	Price, 1 ton	Sales, million \$	Sales, million €	Sales, billion rubles
Copper	4200	\$ 6100	25.62	23.37	1.6
Zink	15 400	\$ 2600	40.04	162.56	2.52
Ferrum	56 000	2000 rubles	2.24	2.04	0.11
Cementitious residue (SiO ₂ , CaCO ₃ , CaSO ₄)	196 000	1000 rubles	3.92	3.56	0.96
Total	_	_	71.82	191.53	4.44

^{1 € = 73} rubles 1 \$ = 63 rubles

this case, estimated reserves of copper of the category C, + C, in the sludge of the valley of the Istok river and the Elchevsky teatment pond can be estimated at 14250 tons (6000 tons + 8250 tons).

According to the data of PISC Uraltsvetmetrazvedka for 2003, silver reserves in the sludges of the Elchevsky pond amounted to 0.736 tons with an average grade of 1.6 ppm. The gold content in the sludge was not determined. At the same time, according to CJSC "NPK Ekologia", in the sludge (silt) sample taken from the Elchevsky pond, gold was determined in the amount of 1.1 ppm. However, the absence of geological description of the material of this sample does not allow determining its genesis and classifying it as sludge or alluvium-deluvium. The mineral assemblage and distribution of noble metal contents by area and thickness of deposits of sludge from the Degtyarsky pit has not been studied.

Predicted resources of ore sludge from another largest copper mine, Levikhinsky, are estimated at 5 million tons. The condi-

tional predicted reserves of copper of $C_1 + C_2$ category with a content of 1.5% in its sludge will be more than 18 750 tons. CJSC "NPK Ekologia" together with Nedra group of companies has formed a promising business plan for extraction and processing of ore sludge in the licensed site of the Istok river. In particular, it provides information on the volume and cost of non-ferrous metals and related raw materials that can be extracted in the site of the valley of the Istok river1 (Table 2, with the author's amendment of rough prices for July 2018).

Auriferous alluvials of the river valleys Istok and Elchyovka

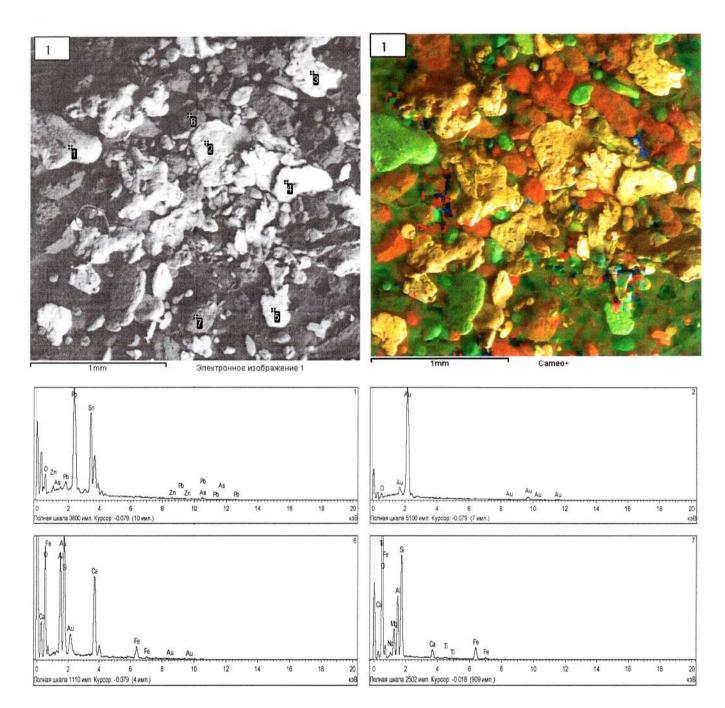
Further, special attention should be paid to the fact that areas occupied by river valleys Istok and Elchyovka are located in the area of distribution of alluvial placers with an average industrial gold content of 180-235 mg/m³. The geological structure of the Degtyarsky pit indicates the presence of the latter within the territory under consideration. Along the valley of the Elchyovka river (its affluents and ravines are located within the territory of tectonically disturbed eastern exocontact of the Revdinsky gabbro massif, which serves as the alimentation zone of the robbed-out gold alluvial deposits) there are often traces of old mining. There is the Elchyovskoye occurrence of surface gold at the mouth of the Istok river. The orebody of gold can be the intrusive body of the medium acidic composition of the fourth phase of the Revda complex.

The swampy area of the Istok site is composed of alluvial sediments, which are overlapped by silts and sludge supplied by waters from the abandoned Degtyarsky pit. Since the valley of the Istok river is known for the previously worked-out prospecting gold-bearing alluvial Pre-Quaternary and modern placers, one should expect to have the richest industrial placer of gold in the alluvium of the Elchyovsky pond. Although the Elchyovsky teatment pond is a water protection object, technogenic sludges covering the alluvial-deluvial sediments of its water area have overflowed the pond. There is only one way to avoid the disaster: to have the project for construction of dike embankment which cost exceeds 2 billion rubles. One more cost-effective option is cleaning the treatment pond from the sludge with excavation and washing of gold-bearing alluvial-deluvial sediments of the pond.

Table 3. The results of the samples studying by CJSC "NPK Ekologia". Таблица 3. Результаты исследований проб ООО НПК «Экология».

Sample's name	Weight of initial sample, kg	Mass fraction, grain-size class – 1.4+0 mm, %	Weight of extractable Au in the sample, g	Au mass fraction in the initial sample, ppm	Au mass fraction in the initial sample, g/m³
C31	35.40	50.56	0.0033	0.093	0.167
C32	38.00	50.61	0.0110	0.289	0.520
C33	40.00	61.68	0.0188	0.470	0.846
C34	38.00	61.79	0.0110	0.289	0.520
C35	36.60	50.22	0.0055	0.150	0.270
C36	37.42	53.89	0.0338	0.903	1.625
C37	33.84	69.21	0.0055	0.162	0.291
C38	35.22	62.86	0.0011	0.031	0.056
C39	34.30	66.66	0.0031	0.090	0.162
Total	328.78	_	0.0931	2.477	4.457

Karagodin S. S., Mazur S. V., Shinkaryuk I. E. 2015, Biznes-plan investitsionnogo proyekta «Opytno-promyshlennoye predpriyatiye po kompleksnov pererabotke shlamov otrabotannogo Degtyarskogo mednogo rudnika s polucheniyem tovarnov produktsii» [The business plan of the investment project called "Experimental-industrial enterprise for complex processing of waste sludge from the Degtyarsky copper pit for production marketable output"]. Ekaterinburg, 80 p.

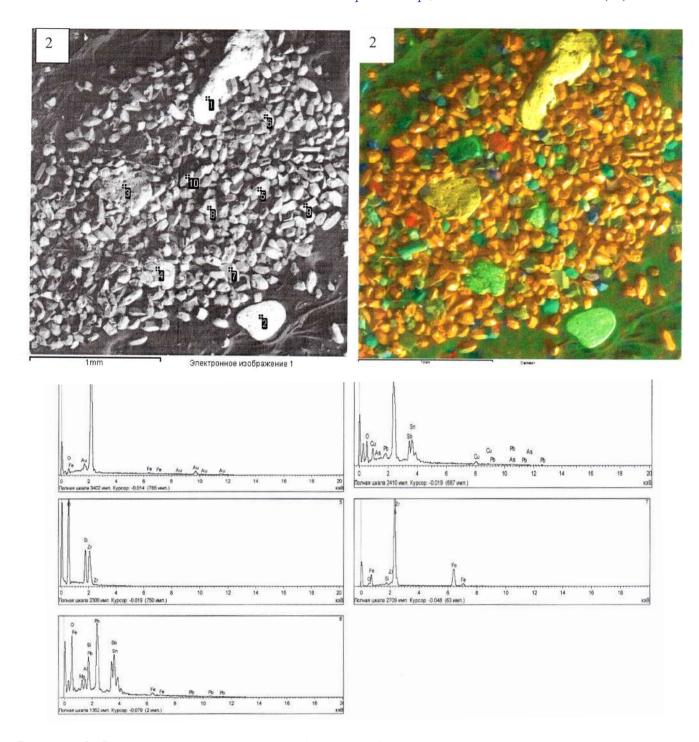


Параметры обработки: выполнен анализ всех элементов (нормализован); все результаты в весовых процентах.

Спектр	0	Na	Mg	Al	Si	Ca	Ti	Fe	Zn	As	Sn	Sb	Au	Pb	Итог
1	10,1								1,5	0,0	46,9			41,5	100,0
2 3 4	3,7 4,3 3,1			0,3				1,3					96,3 94,4 96,6		100,0 100,0 100,0
5	10,8			0,5	0,9					0,0	22,1	22,9		42,9	100,0
6 7	37,3 46,7	0,7	4,5	10,2 9,9	13,7 19,0	21,3 3,2	0,8	9,3 15,1					8,3		100,0 100,0

Изображение поверхности образца № 1 в режимах BSE, <Сатео>, спектры и таблица результатов анализа в выделенных точках.

Figure 2. Electronic photographs and graphics of the study of gold washings using the micrologging sonde (sample no. 1). Рисунок 2. Электронные фотографии и графики исследования шлиха на микрозонде (образец № 1).



Параметры обработки: выполнен анализ всех элементов (нормализован); все результаты в весовых процентах.

Спектр	0	Mg	Al	Si	S	Ti	Fe	Cu	As	Zr	Sn	Sb	Au	Pb	Итог
1	4,0						1,2						94,8		100,0
2	11,7							6,6	0,0		17,8	13,4		50,5	100,0
3	6,1		0,4	2,7									90,7		100,0
4	10,4							3,9	0,2		19,9	23,3		42,3	100,0
5	59,5			10,4						30,1					100,0
6	38,5			14,8						46,7					100,0
7	2,7			0,7	46,4		48,2			2,0					100,0
8	19,6	1,4	1,2	4,0			2,1				18,6	22,2		30,8	100,0
9	59,0			8,8						27,1					100,0
10	57,0		2,6	10,9		5,5				24,0					100,0

Изображение поверхности образца № 2 в режимах BSE, <Сатео>, спектры и таблица результатов анализа в выделенных точках.

Figure 3. Electronic photographs and graphics of the study of gold washings using the micrologging sonde (sample no. 2). Рисунок 3. Электронные фотографии и графики исследования шлиха на микрозонде (образец № 2).

These considerations are practically confirmed by new findings (prior to prospecting and evaluation works). So, when sinking in the valley of the Istok river, the team of CJSC "NPK Ekologia" discovered a previously unknown industrial alluvial gold deposit (Table 3).

As one can determine from the data in the table, the average gold content in this placer was 495 mg/m³ with a sample weight of 328.78 kg, which is composed of nine particular samples weighing from 34 to 40 kg. At the same time the industrial gold content are found in 8 samples: from 162 mg/m³; in four samples, it is especially high: from 520 mg/m³ to 1.625 g/m³.

The samples were taken from the surface dump borders of the pit without a geological description of the test material characterized as "soil". The material composition of the "soil" has not been studied. However, there are some electronic photographs and graphs of the study of gold washings from the "soil" using the micrologging sonde, in which the magnitude of fine (up to one-third micron) placer gold and fineness of gold is visible (Fig. 2, 3).

Since the samples were taken from the surface dumps of the pit without fixation, it is not known from what depth this dump was selected, and it is not possible to judge the thickness of the gold-bearing reservoir. However, the above information undoubtedly indicates the industrial scale of this deposit and the need for its exploration. In addition, in three separate samples of the "soil" (sandy and slimy precipitate) from the valleys of the Istok river, the team of CJSC "NPK Ekologia" have determined: gold in the amount of 0.224 ppm; 0.422 ppm and 3.48 ppm, as well as silver, respectively, – 8.4 ppm; 9.6 ppm and 12.6 ppm.

It is known that sludge from abandoned copper-sulphide fields form industrial technogenic deposits [6, 11, 12, etc.]. The sludges of the Degtyarsky pit are not an exception. It is clear from the above information that they are a remarkable copper-zinc polymetallic ore and form an industrial technogenic deposit.

Geologically, sludge is deposited directly in alluvial and deluvial deposits of the river valleys and ponds, which are of industrial interest as a source of placer gold and industrial minerals – sand gravel mixes [13–15].

Conclusion

Thus, the field in the valley of the Istok river located in a 4.5 km long site (from Degtyarsk to the Elchyovsky pond) and in the Elchyovsky pond itself is complex and promising field for further development. The high economic effect of exploiting such deposits is particularly clearly defined when it is calculated using the methodology proposed by V. A. Dushin and V. S. Karagodin [16].

Considerable profitability of mining such a complex field is a good opportunity to direct funds to artificial revegetation of the territory of the Degtyarsky pit involved in the ecological incident [6–8, https://uraloved.ru/goroda-i-sela/sverdlovskaya-obl/gorod-degtyarsk]; this territory is the part of a beautiful mountainous area defined as Ural Switzerland by some experts.

When addressing environmental issues, first of all, a geoecological assessment should be carried out due to the development of the mine's field transformation [17]. Moreover, one should pay attention to the introduction of modern geotechnological methods of mining, such as biotechnology – metal extraction using bacteria and fungi. In recent decades, biotechnology has been increasingly used both in the operation of primary deposits, and in the elimination of geo-ecological stress, as well as in artificial revegetation [18, 19].

Summary

The immediate task of research within the territory of the Degtyarsky pit is to receive licenses for the Istok and Elchyovka sites, to design a project for geological exploration, to solve environmental problems and to conduct geological exploration with an assessment of reserves of non-ferrous, noble metals and associated raw materials in sludge and alluvium-deluvial mining. The estimated cost of these works ranges from 50–60 to 80 million rubles.

REFERENCES

- 1. Zerkalov D. V. 2012, Ekologicheskaya bezopasnost' [Environmental Safety]. Kiev, 506 p.
- 2. Gubina V. G., Bastrygina T. M., Zaborovsky V. S. 2015, *Ekologicheskiye posledstviya gornodobyvayushchey deyatel'nosti v Krivorozhskom zhelezorudnom basseyne* [Environmental effects of mining activities in the Krivoy Rog iron-producing area]. *Solid commercial minerals application: technological and environmental problems of mining natural and technogenic deposits: II International scientific conference*, December 2–4, 2015: book of reports. Ekaterinburg, pp. 223–224. ISBN 978-966-699-643-8.
- 3. Hudson T. L., Fox F. D., Plumlee G. S. 1999, Metal Mining and the Environment. Alexandria: American Geological Institute, 68 p.
- 4. Udachin V. N., Williamson B., Kitagawa R., Lonschakova G. F., Aminov P. G., Udachina L. G. 2011, Chemical composition and mechanisms of formation of acid mine waters of Southern Urals. *Voda: khimiya i ekologiya* [Water: chemistry and ecology], no. 10, pp. 3–8. (*In Russ.*)
- 5. Yucel D. S., Baba A. 2013, Geochemical Characterization of Acid Mine Lakes in Northwest Turkey and Their Effect on the Environment. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, vol. 64, Issue 3, pp. 357–376. https://doi.org/10.1007/s00244-012-9843-7
- 6. Mormille S. I. et al, 2002, *Tehnogennye mestorozhdeniya Srednego Urala I otsenka ikh vozdeystviya na okruzhayushchuyu sredu* [Technogenic deposits of the Middle Urals and evaluation of their impact on the environment]. Ekaterinburg, 206 p.
- 7. Rybnikova L. S., Rybnikov P. A., Tyutkov O. V. 2014, Assessment of the Flooded Copper Pyrite Pits Impact upon the Middle Urals Water Bodies. *Vodnoye khozyaystvo Rossii* [Water sector of Russia], no. 6, pp. 77–91. (*In Russ.*)
- 8. Staritsyna I. A., Staritsyna N. A. 2016, *Problemy ispol'zovaniya territoriy gornykh otvodov v tselyakh formirovaniya fonda pereraspredeleniya zemel'* [Problems of the use of mining allotments territories in order to form the land redistribution fund]. *Konyaev readings. V Anniversary International scientific conference*: collection of works, pp. 72–75.
- 9. 2004, *Gornoye proizvodstvo tsvetnoy metallurgii Urala* [Mining production of non-ferrous metallurgy of the Urals]. Ed. by V. S. Khokhryakov. Ekaterinburg, 666 p.
- 10. Kontar' E. S. 2013, Geologo-promyshlennyye tipy mestorozhdeniy medi, tsinka, svintsa na Urale (geologicheskiye usloviya razmeshcheniya, istoriya formirovaniya, perspektivy) [Geological and industrial types of deposits of copper, zinc, lead in the Urals (geological conditions of location, history of formation, prospects)]. Ekaterinburg, 199 p.
- 11. V. A. Perepelitsyn, V. M. Rytvin, V. A. Koroteev, A. B. Makarov, V. G. Grigoryev et al. 2013, *Tekhnogennoye mineral'noye syr'ye Urala* [Technogenic mineral raw materials of the Urals]. Ekaterinburg, 332 p.
- 12. Semyachkov A. I., Balashenko V. V., Kosolapov V. V. 2009, *Ekologo-ekonomicheskaya otsenka tekhnogenno-mineral'nykh obrazovaniy* [Ecological and economic assessment of technogenic and mineral formations]. Ed. by A. I. Tatarkin. Ekaterinburg, 196 p.
- 13. Rubinstein Ju., Barsky L. A. 2002, Non-Ferrous Metal Ores. Deposits, Minerals and Plants. N.-Y., London: Taylor and Francis, 424 p.
- 14. Distanov U. G., Filko A. S. (eds.) 1990, Netraditsionnyye vidy nerudnogo mineral'nogo syr'ya [Nonconventional types of non-metallic mineral raw materials]. Moscow, 261 p.
- 15. Tumanova E. S., Tsibizov A. N., Blokha N. T. et al. 1991, *Tekhnogennyye resursy mineral'nogo stroitel'nogo syr'ya* [Technogenic resources of industrial minerals]. Moscow, 208 p.

- 16. Dushin A. V., Karagodin V. S. 2006, *Metodicheskiy podkhod k ekonomicheskoy otsenke mineral'nykh resursov na rannikh stadiyakh geologicheskogo izucheniya nedr* [Technical approach to the economic assessment of mineral resources in the early stages of geological exploration of the subsoil]. Working paper. Ekaterinburg, 78 p.
- 17. Antoninova N. Yu., Shubina L. A., Sobenin A. V. 2016, *Geoekologicheskaya otsenka tekhnogennoy transformatsii zemel'nykh resursov pri osvoyenii mestorozhdeniy poleznykh iskopayemykh* [Geoecological evaluation of technogenic transformation of land resources during the development of mineral deposits]. Ecological and technogenic safety of mining areas: proceedings of IV international scientific conference. Ekaterinburg, pp. 35–40.
- 18. Slavikovsky O. V. 2015, *Kombinirovannyye geotekhnologii osnovnoye napravleniye kompleksnogo osvoyeniya mineral'nykh resursov nedr* [Combined geotechnologies the main direction of the integrated development of mineral resources of the subsoil]. Solid commercial minerals application: technological and environmental problems of mining natural and technogenic deposits: II International scientific conference, December 2–4, 2015: book of reports, Ekaterinburg, pp. 223–224. ISBN 978-966-699-643-8.
- 19. Mahajan S., Gupta A., Sharma R. 2017, Bioleaching and Biomining. In: Singh R. (ed.) Principles and Applications of Environmental Biotechnology for a Sustainable Future. Applied Environmental Science and Engineering for a Sustainable Future. Singapore: Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-10-1866-4_13

The article was received on August 8, 2018

УДК 553.3.072; 071

https://doi.org/10.21440/2307-2091-2018-4-114-121

К вопросу о перспективах (второй жизни) заброшенных медноколчеданных рудников Урала

Сфен Степанович КАРАГОДИН1. Владимир Сфенович КАРАГОДИН², ", Юрий Петрович МОРОЗОВ², "", Иван Васильевич ЗАУЗОЛКОВ^{3, ****}

¹ООО Концерн «Недра», Россия, Екатеринбург

²Уральский государственный горный университет, Россия, Екатеринбург

³ООО НПК «Экология», Россия, Екатеринбург

Актуальность рассматриваемой темы обусловлена обеспокоенностью современного цивилизованного общества негативным влиянием на экологию техногенных образований горнодобывающей деятельности.

Техногенные руды заброшенных медноколчеданных рудников представлены шламами, которые выносятся подземными водами из заброшенных шахт и горных отвалов, отлагаются в поверхностных водоемах и служат источником экологических бедствий. Они переполняют естественные и искусственно создаваемые отстойники, а несущие их шахтные воды угрожающе повышают кислотность в охраняемых водоемах, которые служат резервуарами питьевого водоснабжения миллионных городов.

Вместе с тем в последние годы установлена промышленная ценность этих шламов, разработана технология извлечения из них цветных металлов и полезных сопутствующих компонентов. Показательно, что шламы обычно залегают на аллювиальных и делювиальных отложениях речных долин и прудов, которые представляют промышленный интерес как источник россыпного золота и строительных материалов — песчано-гравийных смесей. Потребность в добыче больших объемов последних особенно актуальна, так как здесь запланирована и реализуется обширная программа строительства.

Целью настоящей публикации является привлечение внимания бизнеса и общественности к экономически привлекательному проекту разработки техногенных медно-цинковых руд заброшенных рудников Урала с одновременным решением экологических проблем.

Методология. Работа выполнена авторами с использованием результатов собственных исследований и привлечением и анализом фондовых материалов в содружестве с коллективом ООО Концерн «Недра».

В результате работы показано наличие на территории заброшенного Дегтярского рудника промышленного техногенного медно-цинкового месторождения и спрогнозировано присутствие в комплексе с ним золотоносных россыпей.

Выводы. Ближайшей задачей исследований на территории Дегтярского рудника является получение лицензий на участки «Исток» и «Ельчёвка», составление проекта геологоразведочных работ, решение экологических проблем и проведение геологоразведочных работ с оценкой запасов цветных, благородных металлов и сопутствующего сырья в шламах и аллюво-делювии. Ориентировочная стоимость этих работ составляет от 50–60 до 80 млн руб.

Ключевые слова: техногенное месторождение, комплексное месторождение, медно-цинковые руды, аллювиальное золото, строительные материалы, экологические проблемы.

ЛИТЕРАТУРА

- ЛИТЕРАТУРА

 1. Зеркалов Д. В. Экологическая безопасность. Киев: Основа, 2012. 506 с.

 2. Губина В. Г., Бастрыгина Т. М., Заборовский В. С. Экологические последствия горнодобывающей деятельности в криворожском железорудном бассейне // Технологические и экологические проблемы отработки природных и техногенных месторождений: II Межд. научнопракт. конф. 2–4 декабря 2015: сб. докл. Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2015. С. 223–224. ISBN 978-966-699-643-8.

 3. Hudson T. L, Fox F. D., Plumlee G. S. Metal Mining and the Environment. Alexandria: American Geological Institute, 1999. 68 р.

 4. Удачин В. Н., Вильямсон Б., Китагава Р., Лонщакова Г. Ф., Аминов П. Г., Удачина Л. Г. Химический состав и механизмы формирования кислых рудничных вод Южного Урала // Вода: химия и экология. 2011. № 10. С. 3–8.

 5. Yucel D. S., Baba A. Geochemical Characterization of Acid Mine Lakes in Northwest Turkey and Their Effect on the Environment // Archives of Environmental Contamination and Toxicology. 2013. Vol. 64. Issue 3. P. 357–376. https://doi.org/10.1007/s00244-012-9843-7

- 5. тисе D. S., Вара А. Geochemical Characterization of Acid Mine Lakes in Northwest Turkey and Their Elect of the Environmental Contamination and Toxicology. 2013. Vol. 64, Issue 3. P. 357–376. https://doi.org/10.1007/s00244-012-9843-7
 6. Техногенные месторождения Среднего Урала и оценка их воздействия на окружающую среду / С. И. Мормиль и др. Екатеринбург, 2002. 206 с.
 7. Рыбникова Л. С., Рыбников П. А., Тютков О. В. Оценка влияния затопленных медноколчеданных рудников на водные объекты Среднего Урала // Водное хозяйство России. 2014. № 6. С. 77–91.
- Урала // Водное хозяйство России. 2014. № 6. С. 77–91.

 8. Старицына И. А, Старицына Н. А. Проблемы использования территорий горных отводов в целях формирования фонда перераспределения земель // Коняревские чтения. V Юбилейная Междунар. науч.-практ. конф.: сб. трудов. 2016. С. 72–75.

 9. Горное производство цветной металлургии Урала / под ред. В. С. Хохрякова: Изд-во Уральской гос. горно-геол. акад. Екатеринбург, 2004. 666 с.

 10. Контарь Е. С. Геолого-промышленные типы месторождений меди, цинка, свинца на Урале (геологические условия размещения, история формирования, перспективы). Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2013. 199 с.

 11. Техногенное минеральное сырье Урала / В. А. Перепелицын, В. М. Рытвин, В. А. Коротеев, А. Б. Макаров, В. Г. Григорьев и др. Екатеринбург: РИО УрО РАН, 2013. 332 с.

 12. Семячков А. И., Балашенко В. В., Косолапов В. В. Эколого-экономическая оценка техногенно-минеральных образований / под ред. академика РАН А. И. Татаркина. Екатеринбург: ИЭ УрО РАН, 2009. 196 с.

 13. Rubinstein. III. Barsky I. A. Non-Ferrous Metal Ores. Deposits. Minerals and Plants. N.-Y. London: Taylor and Francis. 2002. 424 р.

- академика РАП А. И. Татаркина. Ekaтериноург. ИЗ УРО РАП, 2009. 190 С.
 13. Rubinstein Ju., Barsky L. A. Non-Ferrous Metal Ores. Deposits, Minerals and Plants. N.-Y., London: Taylor and Francis, 2002. 424 р.
 14. Нетрадиционные виды нерудного минерального сырья / под ред. У. Г. Дистанова, А. С. Филько. М.: Недра, 1990. 261 с.
 15. Техногенные ресурсы минерального строительного сырья / Е. С. Туманова, А. Н. Цибизов, Н. Т. Блоха и др. М.: Недра, 1991. 208 с.
 16. Душин А. В., Карагодин В. С. Методический подход к экономической оценке минеральных ресурсов на ранних стадиях геологического изучения недр. Препринт. Екатеринбург: Институт экономики УрО РАН, 2006. 78 с/
- изучения недр. Препринт. Екатериноург: Институт экономики УрО РАН, 2006. /8 с/
 17. Антонинова Н. Ю., Шубина Л. А., Собенин А. В. Геоэкологическая оценка техногенной трансформации земельных ресурсов при освоении месторождений полезных ископаемых // Экологическая и техносферная безопасность горнопромышленных регионов: тр. IV Междунар. науч.-практ. конф. Екатеринбург: УГГУ; ИЭ УРО РАН. 2016. С. 35–40.
 18. Славиковский О. В. Комбинированные геотехнологии основное направление комплексного освоения минеральных ресурсов недр // Технологические и экологические проблемы отработки природных и техногенных месторождений: II Межд. научно-практ. конф. 2–4 декабря 2015: сб. докл. Екатеринбург: ИГД УРО РАН, 2015. С. 223–224. ISBN 978-966-699-643-8.
 19. Mahajan S., Gupta A., Sharma R. Bioleaching and Biomining. In: Singh R. (ed.) Principles and Applications of Environmental Biotechnology for a Sustainable Future. Applied Environmental Science and Engineering for a Sustainable Future. Springer, 2017. https://doi.org/10.1007/978-981-10-1866-4.13
- org/10.1007/978-981-10-1866-4_13

Статья поступила в редакцию 8 августа 2018 г.

https://orcid.org/0000-0002-5882-821X karagodinDEC@yandex.ru "tails2002@inbox.ru sfen80k@mail.ru ecolnpk@mail.ru

VЛК 330 15

Модель устойчивого развития: условия реализации

Олег Валерианович КОСОЛАПОВ^{1,1}, Владимир Евгеньевич СТРОВСКИЙ^{2,11},

¹АО «Уральская медная компания», Россия, Екатеринбург

²Уральский государственный горный университет, Россия, Екатеринбург

Актуальность. Для современного этапа неоспоримым фактом является необходимость перехода на новый путь развития, обеспечивающий сбалансированность экономики и экологии, что предотвратит разрушение цивилизации под влиянием экологического кризиса. Такой путь определяет концепция устойчивого развития, которая, как считается, может решить одновременно две задачи: экономический рост и сохранение природы. Однако и сегодня, по прошествии двадцати шести лет с момента конференции в Рио (1992), положительные оценки в отношении реализации концепции отсутствуют.

Шель работы – определить наиболее вероятные направления деятельности, способствующие переходу на новый путь развития.

Результаты исследования: в статье уточняется понятие устойчивого развития, приводится авторское определение, в котором акцентируется внимание на условии сохранения регулятивных функций экосистем и необходимости трансформации сознания социума в части его экологизации. В схематичном виде отображаются концептуальные подходы и условия реализаций модели устойчивого развития на государственном уровне, где отражена необходимость соблюдения экологических ограничений, планирование численности, ограничение потребностей, экологичность технологий, совершенствование правовых основ устойчивого развития и т. а. Обоснована целевая ориентация подсистем эколого-экономической системы на локальном уровне в отношении предприятий, осваивающих ресурсы недр и самой эколого-экономической системы, целесообразность объединения экономической и социальной подсистем в единую социально-экономическую подсистему, а также требование согласованности техногенной нагрузки с экологической техноемкостью территории и культуры природопользования.

Выводы. Обоснованные условия перехода на новую эколого-экономическую модель развития на государственном и локальном уровнях управления определяют основные направления деятельности, позволяющие приблизить момент реализации концепции устойчивого развития.

Ключевые слова: концепция, устойчивое развитие, реализация, направления деятельности, сбалансированность.

Конференция в Рио (1992) ознаменовала признание необходимости перехода мирового сообщества на новый путь развития [1]. Представители 178 государств, присутствующие на конференции, поддержали основные положения концепции устойчивого развития, закрепленные Декларацией Рио, которые легли в основу «Повестки дня на XXI век». Согласно этому документу, национальные стратегии должны адаптироваться к задачам устойчивости, т. е. обеспечивать гармонизацию экологических, социальных и экономических мер и планов, действующих в той или иной стране. Целью устойчивого развития, согласно «Повестке дня на XXI век», является усиление социальной ориентации развития экономики и одновременно сохранение ресурсной базы и среды обитания для благополучия будущих поколений. В число основных составляющих «Повестки дня на XX век» вошли: Хартия Земли, содержащая не столько правовые, сколько моральные природоохранные обязательства, план действий по интеграции целей охраны окружающей среды и развития в XXI веке, специальные международно-правовые инструменты для реализации этого плана, другие средства его выполнения, включая институциональные механизмы, фондовое обеспечение, передачу технологий, образовательные мероприятия и другие меры [2].

Предполагалось, что устойчивое развитие сможет решить одновременно две задачи: и обеспечивать экономический рост, и сохранять природу [3]. Цель в данном случае, выражаясь языком системотехники, отражала желаемое состояние – экологически устойчивое социально-экономическое развитие, но реальность ее достижения до сих пор остается неосуществимой [4]. И сегодня не умолкают споры по поводу определения сущности понятия устойчивого развития, сопоставления понятий устойчивости и развития, характеристики цели и ее декомпозиции и т. д., в то же время пути перехода к устойчивому развитию научно не обоснованы. Продолжает оставаться надежда на научнотехнический прогресс в преодолении экологического кризиса при отсутствии отказа от наращивания потребления материальных благ.

Существуют десятки определений устойчивого развития:

- развитие человечества, при котором удовлетворение потребностей настоящих поколений осуществляется без ущерба для будущих поколений: управляемое сбалансированное развитие общества, не разрушающее своей природной основы и обеспечивающее непрерывный прогресс цивилизации [5];
- длительное непрерывное развитие, обеспечивающее потребности живущих сегодня людей без ущерба удовлетворения потребностей будущих поколений [6];
- постоянно поддерживаемое развитие это улучшение качества жизни людей, живущих в пределах несущей емкости поддерживающих экосистем [7];
- развитие экономики с одновременным повышением качества жизни населения и снижением экологической нагрузки на окружающую среду, достигаемое путем формирования «зеленой экономики» [8];
- развитие, которое обеспечивает удовлетворение нужд существующего поколения и повышение качества его жизни без подрыва основ жизни будущих поколений [9];

https://orcid.org/0000-0001-5342-813X

™⊠ rinis@mail.ru

https://orcid.org/0000-0001-6898-4286

^{*}nedra1958@mail.ru

- создание такой экономической модели, которая основывается на экологических императивах и принципах социальной справедливости, учитывает меру биосферных процессов и допустимую антропогенную нагрузку на окружающую среду [10];
- развитие человечества, при котором не разрушается природная база этого развития, т. е. воспроизводится пригодная для существования человека окружающая среда, поддерживается достаточная ресурсная база, сохраняется геном человека [11].

В работе [12] устойчивым развитием признается «модель социально-экономического развития, при которой реализуется высокий коэффициент будущего и достигается удовлетворение жизненных потребностей нынешнего поколения людей без лишения такой возможности будущих поколений». Автор работы [13] считает устойчивым «развитие, которое сочетает в себе неуклонные улучшения экономических и социальных условий жизни с долговременным сохранением природных основ этой жизни». Детальное исследование категории «устойчивое развитие» выполнено в работе [14], в котором авторы анализируют определения этой категории, сформулированные исследователями в 44 источниках, и предлагают свое определение устойчивого развития как «совокупность процессов позитивных изменений воплощающих их технологий, направленных на гармонизацию отношений между экологической, экономической и социальной сферами для удовлетворения потребностей социально-экономической системы в долгосрочном существовании». Чаще всего используется формулировка устойчивого развития, данная в докладе Комиссии Брундтланд: это «развитие, которое удовлетворяет потребности настоящего поколения, но не ставит под угрозу способность будущих поколений удовлетворять свои собственные потребности».

В авторской интерпретации устойчивым является такое развитие, при котором достигается улучшение экономических и социальных условий жизни населения без разрушения биосферы и нарушения регулятивных функций экосистем при условии кардинальной трансформации сознания социума и упрочения идеи неосферогенеза. Ключевым аспектом концепции устойчивого развития, сформированной для решения проблемы сбалансированного взаимодействия общества и природы, является сохранение динамического равновесия биосферы, переход от существующего экстенсивного природопользования к равновесному, который основывается на сохранении условий для самовосстановления природы [15].

Результаты

Чаще всего на практике устойчивое развитие характеризуют с точки зрения экоэффективности как экологически сбалансированное, обеспечивающее минимизацию антропогенных воздействий, соблюдение экологических ограничений, постоянное возобновление использованных возобновимых ресурсов, а также восстановление нарушенных и загрязненных; недопущение истощения эколого-ресурсного потенциала; сохранение биоразнообразия и сохранение невозобновимых природных ресурсов. Однако устойчивое развитие предполагает реализацию и условия экосправедливости: решение вопросов справедливых отношений между поколениями и в рамках одного поколения, справедливое распределение благ, т. е. вопросов, социальных по своему характеру. В социальном плане устойчивое развитие должно быть ориентировано на повышение уровня жизни населения, преодоление бедности, увеличение инвестиций в человеческий капитал [16].

Модель устойчивого развития предполагает реализацию трех целей: обеспечение социальной справедливости, экономической эффективности и экологического императива, что в конечном счете приводит к системно-синергетическому эффекту. Обеспечение совокупной реализации целей представляет собой достаточно сложную задачу в силу их конфликтности. Концепция устойчивого развития требует оценки значимости целей (процедуры взвешивания целей) с точки зрения общества. Естественно, что в ходе развития общества, получения новых знаний, изменения обстановки приоритетность целевых установок будет изменяться [17]. Однако во всех случаях остается неизменным обеспечение единства экономики, экологии и социальной справедливости, сбалансированность экологических, экономических и социальных целевых ориентиров.

Концептуальные условия перехода к реализации концепции устойчивого развития отражены на рис. 1, из которого следует, что переход к устойчивому развитию требует изменения отношения к экологическому фактору, преодоления потребительского подхода, реализации политики ресурсосбережения, масштабного освоения вторично-сырьевого потенциала, всесторонней экологизации сознания, производства и законодательства, любых управленческих решений. Указанные условия, обеспечивающие переход к устойчивому развитию, в полной мере относятся ко всем видам природопользования, в том числе к недропользованию. Особая роль принадлежит в данном случае предприятиям, осваивающим ресурсы недр, предметом труда которых выступают минеральные ресурсы.

Специфической особенностью горной промышленности является перераспределение огромной массы горных пород как в литосфере, так и на земной поверхности. Одновременно с извлечением единицы твердого полезного ископаемого на поверхности земли размещается до 6–7 единиц пустой породы. Происходят глобальные изменения (по расчетам специалистов, годовая масса вещества, извлекаемого из литосферы и включаемого в оборот на земной поверхности, составляет около половины мировой величины сухого веса биомассы) [18]. С процессом добычи и первичной переработкой связаны и другие виды антропогенного воздействия (загрязнение, нарушение ландшафта и др.), обусловливающего формирование последствий экономического, экологического и социального характера [19].

Конкретизация целевой ориентации подсистем эколого-экономической системы (ЭЭС) горного предприятия имеет вид, получивший отражение на рис. 2.

Она может быть охарактеризована как сбалансированность целей природной (экологической), социальной и экономической подсистем. В условиях предприятия целесообразно объединение социальной и экономической подсистем в одну социально-экономической устойчивости [20], о которой

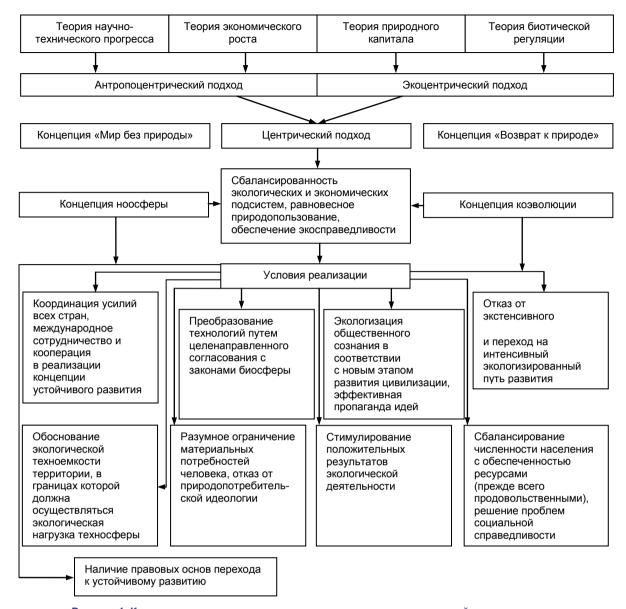


Рисунок 1. Концептуальные подходы и условия реализации модели устойчивого развития.

Figure 1. Conceptual approaches and conditions for the implementation of a sustainable development model.

свидетельствует сохранение траектории экономической и социальной эффективности предприятия, отвечающей сбалансированности социальных и экономических интересов субъектов горнодобывающего предприятия. Однако первостепенную значимость имеет сбалансированность экономической и экологической подсистем, основой которой выступает соизмерение экологической техноемкости территории и природоемкости техносферы, при котором воздействие на природную среду не приводит к функциональным нарушениям последней:

TH \leq \exists TT,

где TH – природоемкость техносферы (производства) территории; ЭТТ – экологическая техноемкость территории, отражающая самовосстановительный потенциал природной среды и количественно равная максимальной техногенной нагрузке, которую может выдержать в течение длительного времени совокупность всех реципиентов и экологических систем территории без нарушения их структурных и функциональных свойств [21].

Согласно работам исследователей, рассматриваемые величины могут иметь энергетическое или стоимостное выражение, а также могут быть охарактеризованы массой веществ, приведенной к единому классу опасности, т. е. сопоставимы по токсичности. При отсутствии выполнения подобных сопоставлений управление процессом освоения ресурсов недр должно быть ориентировано на снижение антропогенного воздействия на окружающую среду, обеспечение экологической безопасности недропользования, что способствует сохранению качества окружающей человека среды и поддержанию механизма биотической регуляции экосистем [22]. Несомненна и значимость духовного оздоровления общества, экологизации сознания персонала предприятия, в первую очередь, аппарата управленцев, принимающих решения в отношении разработки месторождений [23].



Рисунок 2. Целевая ориентация подсистем ЭЭС горного предприятия.

Figure 2. The target orientation of the subsystems of the ecological-economic system of the mining enterprise.

Выводы

Условия перехода на модель устойчивого развития, а также конкретизация целевой ориентации подсистем ЭЭС горного предприятия, обоснованные в статье, позволяют определить направленность управленческих решений, реализация которых наиболее целесообразна для достижения поставленной цели перехода на новую эколого-экономическую модель развития.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Dotsenko E., Ezdina N. Sustainable Subsoil Use as a Factor of Innovative Development of Mining Region // E3S Web of Conferences. 2018. Vol. 41. 04048. https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184104048
- 2. Пахомова Н. В., Рихтер К. К. Экономика природопользования и экологический менеджмент. СПб: Изд-во СПб. ун-та, 1999. 488 с.
- 3. Corina Ana B. Management of Romanian natural resources // 12th International Multidisciplinary Scientific GeoConference and EXPO Modern Management of Mine Producing, Geology and Environmental Protection, SGEM 2012. Bulgaria: Varna, 2012. Vol. 4. P. 1045–1050. 4. Данилов-Данильян В. И., Лосев К. С. Экологический вызов и устойчивое развитие. М.: Прогресс-Традиция, 2000. 416 с.
- Урсул А. Д. Переход России к устойчивому развитию. Ноосферная стратегия. М.: Изд. дом «Носфера», 1998. 500 с.
- 6. Hillerbrand M. Nachhaltige Entwicklung: Ein Leitbild für das 21. Jahrhundert // Standpunkte. 1997. Vol. 10(4). S. 26–29.
- 7. Munro D. A. (ed.) Caring for the Earth: A Strategy for Sustainable Living. 1991. 228 p.
- 8. Яшалова Н. Н. Ґенезис и перспективы развития концепции устойчивого развития // Экономика природопользования. 2016. № 2. С. 4–17.
- 9. Ягодин Г. А., Пуртова Е. Е. Устойчивое развитие: будущее цивилизации // Экология и промышленность России. 2001. № 7. С. 36–38.
- 10. Жигарев В. В. Глобальные и региональные аспекты устойчивого развития // Проблемы региональной экологии. 2006. № 6. С. 67–72.
- 11. Данилов-Данильян В. И., Лосев К. С. Исходные положения устойчивого развития // Устойчивое развитие. Обзор. информация. 1999. № 4. C. 3-9.
- 12. Ахатов А. Эколого-экономическая модель Татарстана и переход к устойчивому развитию // Экология: безопасность нации: сб. трудов. Казань, 1998. С. 79-92.
- 13. Кондратьев К. Я. Проблемы устойчивого развития современной цивилизации // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. 2005. № 12. C. 3-10.
- 14. Алферова Т. В., Третьякова Е. А. Концептуальное моделирование категории «устойчивое развитие» // Журнал экономической теории. 2012. № 4. C. 46–52.
- 15. Krausmann F., Schandl H., Eisenmenger N., Giljum S., Jackson T. Material Flow Accounting: Measuring Global Material Use for Sustainable Development // Annual Review of Environment and Resources. 2017. Vol. 42. P. 647-675. https://doi.org/10.1146/annurev-environ-102016-060726 16. Игнатьева М. Н., Косолапов О. В. Сущность понятия «устойчивое развитие» // Изв. вузов Горный журнал. 2014. № 2. С. 21–25.
- 17. Riza S. P., Murtuzayeva M. Application saaty pair comparisons method to the investments distribution in parameters of ecological sustainability // Problems of Cybernetics and Informatics 2012: Proceedings of 4th International Conference, PCI 2012. Azerbaijan: Baku, 2012. C. 214–216. https://doi.org/10.1109/ICPCI.2012.6486490
- 18. Трубецкой К. Н., Галченко Ю. Л., Бурцев Л. Н. Экологические проблемы освоения недр при устойчивом развитии природы и общества. М.: Научтехлитиздат, 2003. 262 с.
- 19. Wu G., Wei D., Zhou Z. D., Tang M. F., Fu, X. A. A summary of study on ecological restoration technology of large coal bases construction in China // Shengtai Xuebao/Acta Ecologica Sinica. 2014. Vol. 34(11). (In Chinese). https://dx.doi.org/10.5846/stxb201308092052
- 20. Каплан А. В. Управление социально-экономическим развитием горнодобывающего предприятия. М.: Экономика, 2015. 270 с.
- 21. Акимова Т. А., Хаскин В. В. Экология. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2006. 495 с.
- 22. Popovich I. N. Sustainable development of coal industry as a priority of the state // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. 2014. № 2. P. 30-35.
- 23. Hyle M. A. Conceptual reflection on responsive environmental governance // International Journal of Public Administration. 2016. Vol. 39(8). P. 610-619. https://doi.org/10.1080/01900692.2015.1034320

Статья поступила в редакцию 13 мая 2018 г.

УДК 330.15

Model of sustainable development: conditions for its implementation

Oleg Valerianovich KOSOLAPOV^{1,5} Vladimir Evgen'evich STROVSKIY2,"

¹Russian Copper Company Limited, Ekaterinburg, Russia

²Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia

Relevance. Nowadays, the indisputable fact is the need to move to a new path of development, ensuring a balanced economy and ecology, which will prevent the destruction of civilization under the influence of an environmental crisis. This path is determined by the concept of sustainable development, which, as it is believed, can simultaneously solve two tasks; economic growth and nature conservation. However, twenty-six years on from the date of the Rio Conference (1992), there are no positive estimates regarding the implementation of the concept.

Purpose of the work is to determine the most likely areas of activity that contribute to the transition to a new path of development.

Results of the study. This paper clarifies the concept of sustainable development, provides the author's definition, which focuses on the condition of maintaining the regulatory functions of ecosystems and the need to transform the consciousness of society in terms of its environmentalization. Some conceptual approaches and conditions for the implementation of a sustainable development model at the state level are displayed in a schematic form, reflecting the need to comply with environmental restrictions, population planning, limiting needs, environmental technology, improving the legal framework for sustainable development, etc. The target orientation of the subsystems of the ecological-economic system at the regional level is justified in relation to enterprises mastering the resources of the subsoil and the ecological-economic system itself, the expediency of combining the economic and social subsystems into a single socio-economic subsystem, as well as the requirement of consistency of man-induced load with the ecological technological intensity of the territory and civility for natural resource use.

Conclusions. The substantiated conditions for the transition to a new ecological and economic model of development at the level of public administration determine the main areas of activity that allow us to bring closer the moment of implementing the concept of sustainable development.

Keywords: concept, sustainable development, implementation, areas of activities, equation.

REFERENCES

- 1. Dotsenko E., Ezdina N. 2018, Sustainable Subsoil Use as a Factor of Innovative Development of Mining Region. E3S Web of Conferences, vol. 41. 04048. https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184104048
- 2. Pakhomova N. V., Rikhter K. K. 1999, *Ekonomika prirodopol'zovaniya i ekologicheskiy menedzhment* [Economics of nature use and environmental management]. Saint Petersburg, 488 p.
- 3. Corina Ana B. 2012, Management of Romanian natural resources. 12th International Multidisciplinary Scientific GeoConference and EXPO Modern Management of Mine Producing, Geology and Environmental Protection, SGEM 2012. Bulgaria: Varna, vol. 4, pp. 1045–1050.

 4. Danilov-Danilyan V. I., Losev K. S. 2000, Ekologicheskiy vyzov i ustoychivoye razvitiye [Environmental challenge and sustainable development],
- Moscow, 416 p.
 5. Ursul A. D. 1998, Perekhod Rossii k ustoychivomu razvitiyu. Noosfernaya strategiya [Russia's transition to sustainable development. Noospheric
- strategy]. Moscow, 500 p.
- 6. Hillerbrand M. 1997, Nachhaltige Entwicklung: Ein Leitbild für das 21. Jahrhundert. Standpunkte, vol. 10(4), pp. 26–29.
- Munro D. A. (ed.) 1991, Caring for the Earth: A Strategy for Sustainable Living. 228 p.
- 8. Yashalova N. N. 2016, Genezis i perspektivy razvitiya kontseptsii ustoychivogo razvitiya [Genesis and development prospects of the concept of sustainable development]. Ekonomika prirodopol'zovaniya [Economics of nature use], no. 2, pp. 4-17.
- 9. Yaqodin G. A., Purtova E. E. 2001. Sustainable development: future of civilization, Ekologia i promyshlennost Rossii [Ecology and industry of Russia], no. 7, pp. 36–38. (In Russ.)

 10. Zhigarev V. V. 2006, Global and regional aspects of sustainable development. *Problemy regional 'noy ekologii* [Regional Environmental Issues],
- no. 6, pp. 67–72. (*In Russ*.)

 11. Danilov-Danilyan V. I., Losev K. S. 1999, *Iskhodnyye polozheniya ustoychivogo razvitiya* [Premises for sustainable development]. *Ustoychivoye*
- razvitiye: obzornaya inf. [Sustainable development: precis articles], no. 4, pp. 3–9.

 12. Akhatov A. 1998, *Ekologo-ekonomicheskaya model' Tatarstana i perekhod k ustoychivomu razvitiyu* [Ecological and economic model of Tatarstan and the transition to sustainable development]. Ecology: population safety, collection of works. Kazan', pp. 79–92.

- 13. Kondratyev K. Ya. 2005, *Problemy ustoychivogo razvitiya sovremennoy tsivilizatsii* [Problems of sustainable development of modern civilization]. *Problemy okruzhayushchey sredy i prirodnykh resursov* [Environmental and natural resource issues], no. 12, pp. 3–10.

 14. Alferova T. V., Tretyakova E. A. 2012, Conceptual modeling of the category "sustainable development". *Zhurnal ekonomicheskoy teorii* [The Russian Journal of the Economic Theory], no. 4, pp. 46–52. (*In Russ.*)

 15. Krausmann F., Schandl H., Eisenmenger N., Giljum S., Jackson T. 2017, Material Flow Accounting: Measuring Global Material Use for Sustainable Development. *Annual Review of Environment and Resources*, vol. 42. pp. 647–675. https://doi.org/10.1146/annurev-environ-102016-060726

 16. Ignat'eva M. N., Kosolapov O. V. 2014, Essence of the concept "sustainable development". *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal* [News of the Higher Institutions. Mining Journal] pp. 2 pp. 21–25. (*In Russ.*)
- zhurnal [News of the Higher Institutions. Mining Journal], no. 2, pp. 21-25. (In Russ.)
- 17. Riza S. P., Murtuzayeva M. 2012, Application sasty pair comparisons method to the investments distribution in parameters of ecological sustainability. *Problems of Cybernetics and Informatics 2012: Proceedings of 4th International Conference, PCI 2012.* Azerbaijan: Baku, pp. 214–216. https://doi.org/10.1109/ICPCI.2012.6486490

 18. Trubetskoy K. N., Galchenko Yu. L., Burtsev L. N. 2003, *Ekologicheskiye problemy osvoyeniya nedr pri ustoychivom razvitii prirody i obshchestva* [Environmental problems of exploitation of mineral resources while sustainable development of nature and society]. Moscow, 262 p.
- 19. Wu G., Wei D., Zhou Z. D., Tang M. F., Fu, X. A. 2014, A summary of study on ecological restoration technology of large coal bases construction in China. Shengtai Xuebao / Acta Ecologica Sinica, vol. 34(11). (In Chinese). https://dx.doi.org/10.5846/stxb201308092052

 20. Kaplan A. V. 2015, Upravleniye sotsial'no-ekonomicheskim razvitiyem gornodobyvayushchego predpriyatiya [Management of the socioeconomic development of the mining enterprise]. Moscow, 270 p.
- 21. Akimova T. A., Khaskin V. V. 2006, Ekologiya [Ecology]. Moscow, 495 p.
- 22. Popovich I. N. 2014, Sustainable development of coal industry as a priority of the state. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu [Scientific Bulletin of National Mining University], no. 2, pp. 30–35.
- 23. Hyle M. A. 2016, Conceptual reflection on responsive environmental governance. International Journal of Public Administration, vol. 39(8), pp. 610-619. https://doi.org/10.1080/01900692.2015.1034320

The article was received on May 13, 2018

nedra1958@mail.ru

https://orcid.org/0000-0001-5342-813X rinis@mail.ru https://orcid.org/0000-0001-6898-4286

Парадоксы приграничного туризма на востоке России

Ирина Петровна ГЛАЗЫРИНА⁻, Александр Евгеньевич ПЕШКОВ

Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, Россия, Чита

Актуальность исследования процессов развития туризма в регионах восточной части страны обусловлена его высоким потенциалом для экологически благоприятной диверсификации экономики этих территорий, испытывающих существенную экологическую нагрузку вследствие природно-ресурсной ориентации. Высокое качество окружающей среды является необходимым условием устойчивого развития этого сектора, это создает дополнительную экономическую мотивацию бизнес-сообщества для его сохранения, что соответствует основным принципам экологической экономики.

Шелью работы является получение количественных оценок влияния различных факторов на экономические результаты в рамках туристического сектора, связанных с доходами коллективных средств размещения (КСР).

Методология. Для оценки влияния различных факторов на динамику экономических показателей был использован линейный регрессионный анализ с использованием программных ресурсов пакета STATA.

Полученные результаты выявили ряд положительных тенденций в развитии туристического сектора на востоке России, несмотря на значительные внешние шоки после 2014 г. Во всех регионах растет доход КСР, даже скорректированный с учетом индекса физического объема платных услуг населению. Растут отчисления в бюджетную систему РФ везде, за исключением Забайкальского края, где они сократились, при том, что общее количество туристов несколько выросло с 2009 по 2016 г. Вместе с тем выявлен ряд парадоксальных тенденций, которые требуют внимания государственных органов, отвечающих за стратегию регионального развития. Результаты говорят о том, что деятельность, не связанная с размещением туристов, приносит высокую долю дохода для КСР в большинстве рассмотренных регионов, несмотря на активизацию туристических потоков на востоке страны. В том числе со стороны Китая – за последние годы число китайских туристов на озере Байкал стремительно растет.

Выводы. Авторы считают, что полученные результаты являются достаточным основанием для предположения о растушей доле теневого оборота в туристическом секторе и, соответственно, для срочной разработки мер противодействия этим тенденциям.

Ключевые слова: туристическая индустрия, регрессионный анализ, динамика доходов, региональная политика.

Туристическая индустрия может быть значимым фактором в развитии «зеленой» экономики (*Hascmpeчy «зеленой» экономике Poccuu* (обзор). ЮНЭП, 2012. URL: http://www.sustainabledevelopment.ru/upload/File/Reports/ISD_UNEP_GE_Rus.pdf) региона [1]. Как международный, так и российский опыт говорят о том, что для тех территорий, где природные активы являются существенным элементом в организации туристических потоков, в целях обеспечения туристической и рекреационной привлекательности территории необходимо приложить определенные усилия и затраты для сохранения, облагораживания (*Tahoe Facts. URL: http://www.trpa.org/tahoe-facts*), а в некоторых случаях восстановления окружающей среды данной территории [2–4], а также строительства на ней объектов принимающей инфраструктуры (*The Lake Baikal in 21 century: a model of sustainable development or continued degradation? A Comprehensive Program of land use policies for Russian portion of the Lake Baikal Region. N. Y.: Wadhams, 1993. 166 р.) Таким образом, высокое качество окружающей среды является необходимым условием устойчивого развития этого сектора, и это создает дополнительную экономическую мотивацию бизнес-сообщества для его сохранения, что соответствует основным принципам экологической экономики [5].*

Исследованием охвачены семь регионов РФ, вовлеченных в активное трансграничное сотрудничество с Китаем и Монголией и занимающих удобное приграничное положение: Забайкальский край, Республика Бурятия, Иркутская область, Амурская область, Хабаровский край, Приморский край, Алтайский край.

В качестве информационной основы были использованы следующие интернет-ресурсы федеральных и региональных органов, а также информационных агентств: Росстат (URL: http://www.gks.ru), Ростуризм (URL: https://www.russiatourism.ru), ФНС (URL: https://www.nalog.ru).

Для оценки влияния различных факторов на динамику экономических показателей был использован линейный регрессионный анализ с использованием программных ресурсов пакета STATA.

Результаты расчетов и их обсуждение

В период с 2009 по 2013 г. реальные доходы граждан в большинстве российских регионов, в том числе в приграничных регионах Сибири и Дальнего Востока, устойчиво росли. После 2014 г., напротив, отмечается их падение. Однако в этот период произошла девальвация российского рубля, негативно сказавшаяся на многих секторах и отраслях, и предоставила дополнительные сравнительные преимущества для въездного туризма из КНР, который стал постоянным фактором развития экономической деятельности восточных приграничных регионов. Значимой характеристикой развития регионального туристического сектора является динамика доходов коллективных средств размещения (КСР). На рис. 1, а, б представлена динамика доходов КСР в текущих ценах по годам.

Наибольший рост доходов в исследованный период времени показали КСР Приморского края. В текущих ценах увеличение составило более чем 1,6 раза. В абсолютном исчислении наибольшие суммарные доходы имеют КСР Приморского и Хабаровского краев. Забайкальский край в части доходов, полученных КСР в 2009–2016 гг. (в абсолютном выражении), среди семи регионов занял последнее место.

Динамика поступления налогов и сборов от деятельности гостиниц в текущих ценах представлена на рис. 2, a, на рис. 2, b изображен процент прироста налогов и сборов относительно 2009 г.

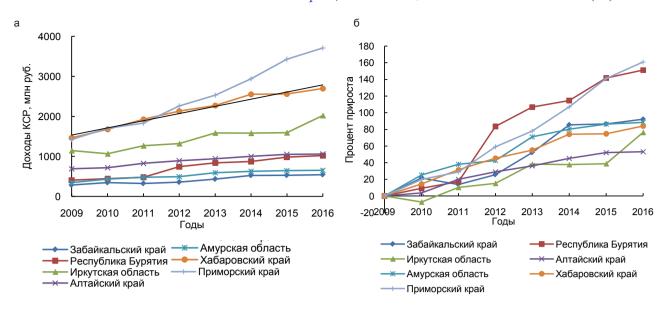


Рисунок 1. Динамика доходов КСР. Figure 1. The income behavior of collective accommodation facilities.

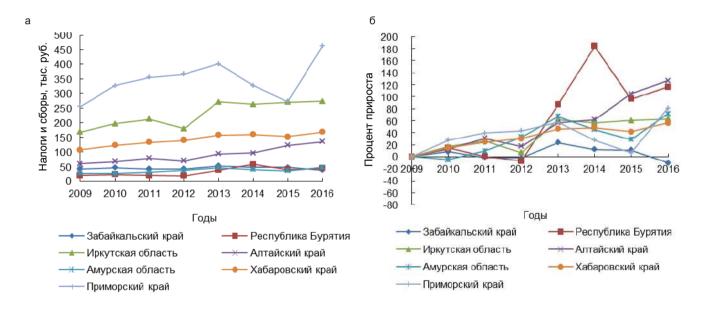


Рисунок 2. Динамика поступления налогов и сборов от деятельности гостиниц в бюджетную систему РФ. Figure 2. The dynamics of return of duties and fees from the activities of hotels to the budget system of the Russian Federation.

Наибольшие поступления налогов и сборов среди семи регионов в исследованный период обеспечивали гостиницы Приморского края (рис. 2, *a*). Существенный прирост (рис. 2, *б*) поступления налогов и сборов в 2016 г. показали Алтайский край (на 126,5 %) и Республика Бурятия (на 116,2 %). В Забайкальском крае в 2016 г. отмечено снижение поступления налогов и сборов от деятельности гостиниц на 10,2 % по сравнению с 2009 г. По объемам поступлений платежей в бюджетную систему РФ край в 2016 г. занял последнее место среди исследованных регионов.

На рис. 3, a приведена динамика численности туристов, посетивших регион, по годам. Рис. 3, b представляет процент прироста численности посетивших регион туристов относительно 2009 г. Учет ведется по гражданам, которые для временного пребывания в регионе использовали услуги КСР.

Приморский край в исследуемый период посетило наибольшее количество туристов. В 2016 г. число лиц, размещенных в КСР (рис. 3, a), превысило 1 млн чел. Если сравнивать с 2009 г. (рис. 3, b), то прирост составил 456 тыс. чел. (76,9 %). Также в числе лидеров по принятым туристам (рис. 3, a) находятся Иркутская область, Алтайский край и Хабаровский край.

Забайкальский край по числу лиц, размещенных в КСР, среди семи регионов занял последнее место, несмотря на то, что на его территории находится крупнейший на российско-китайской границе трансграничный переход Забайкальск-Манчжурия. Отметим, что в процентном отношении число туристов, размещенных в КСР Забайкальского края, в 2016 г. по сравнению с 2009 г. увеличилось на 3,2 % (рис. $3, \delta$).

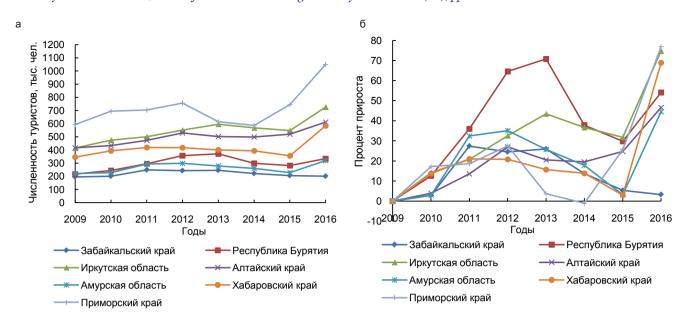


Рисунок 3. Динамика численности туристов, посетивших регион. Figure 3. The dynamics of the number of tourists visiting the region.

С 2014 г. в большинстве исследуемых регионов заметен рост потока туристов. Одна из причин – снижение курса рубля. Ввиду этого отдых для иностранцев в России оказался дешевле, а для россиян стал более доступным на фоне подорожавших зарубежных туров. Однако в этих процессах наметились противоречивые тенденции, проявившиеся на фоне роста туристических потоков из КНР^{1, 2}.

В рамках исследования был проведен линейный регрессионный анализ с использованием программных ресурсов пакета STATA.

Переменные для регрессионного анализа:

- y зависимая переменная доход, полученный коллективными средствами размещения региона (гостиницы, туристические базы и др.), млн руб.;
 - x1 независимая переменная количество посетивших регион туристов, тыс. чел.;
 - x2 независимая переменная число ночевок в коллективных средствах размещения региона, тыс. ед.;
 - x3 независимая переменная число мест в коллективных средствах размещения региона, тыс. ед.

Исходные данные для анализа представлены в табл. 1.

В табл. 2 приведены результаты линейного регрессионного анализа.

Здесь R-squared - коэффициент детерминации, Adj. R-squared - скорректированный коэффициент детерминации, который позволяет устранить эффект, связанный с ростом R-squared при возрастании числа регрессоров. Значения R-squared и Adj. R-squared для всех регионов больше 0,5. Таким образом, можно отметить, что все полученные модели линейного регрессионного анализа являются статистически значимыми.

Довольно неожиданный и даже, на первый взгляд, парадоксальный результат анализа состоит в том, что значения всех коэффициентов регрессионного уравнения для Забайкальского края оказались отрицательными. Это говорит о том, что основные доходы, легально работающие и предоставляющие отчетность КСР, получают не от предоставления проживания, а от других услуг, к которым может относиться сдача помещений в аренду, обслуживание в кафе и ресторанах и др. Отрицательное значение коэффициента регрессии при x1 можно объяснить значительной долей «транзитных» туристов – тех, кто приезжает на один день и не останавливается в регионе, продолжая свой путь дальше – в Китай или в другие города России. Однако тот факт, что отрицательным оказался коэффициент при x2 – число ночевок в КСР региона, – может быть свидетельством того, что рост цен происходит быстрее, чем рост туристических потоков, а также наличия значительной доли теневого сектора в этом сегменте услуг, причем такая же ситуация наблюдается в Бурятии, Амурской области, Хабаровском и Алтайском краях. Еще одной причиной может служить неполнота отчетности КСР; в любом случае это обстоятельство нуждается в особом внимании регулирующих и контролирующих органов.

Переменная х3 отражает не только количество мест в КСР, но и возможность выбора из различных вариантов, что часто бывает важно при организации туров, и, таким образом, предоставляет дополнительные возможности использования туристического потенциала региона. Чем больше число мест в КСР, тем в большей степени регион становится привлекательным местом для проведения конференций, форумов, симпозиумов, особенно крупных и значимых. Наличие интересных туристических объектов часто является важным аргументом при выборе места их проведения, а соответствующая инфраструктура создает благоприятные условия для вовлечения посетителей региона в сферу собственно туристических услуг. Потоки связанных с этим доходов от услуг размещения практически никогда не бывают «в

¹Большой китайский заговор: почему миллионы гостей из Поднебесной не приносят в бюджет Петербурга ни рубля. URL: https://www.spb. kp.ru/daily/26708/3733790

²Туризм в красном тереме. URL: https://www.vedomosti.ru/opinion/articles/2016/07/06/648112-turizm-krasnom-tereme

Таблица 1. Исходные данные для линейного регрессионного анализа. Table 1. The initial values for linear regression analysis.

Переменная -	Годы												
	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016					
	Забайкальский край												
У	282,8	343,9	322	355,2	430,1	524,2	527,3	543,6					
<i>x</i> 1	194,8	200,4	248,1	242,5	245,3	221,5	205,2	201,1					
<i>x</i> 2	793,2	790,4	587,7	526,7	494,9	422,6	371,2	327,2					
<i>x</i> 3	8,9	8,1	7,5	7,3	7,5	7,3	7,4	7,3					
				Республ	тика Бурятия								
У	405,6	443,2	475,9	744,1	839	870,2	980	1019,2					
<i>x</i> 1	217	244,4	295,1	357,2	370,7	299	281,7	334,5					
x2	974	1002	752,8	754,2	707,6	617,4	581,7	640,3					
<i>x</i> 3	12,6	10	11,7	12,4	12,5	15,1	13,4	12,6					
	Иркутская область												
У	1146,5	1063,6	1265,2	1320,7	1585,5	1579,9	1590,7	2022,3					
<i>x</i> 1	415	473,8	501	550,3	595,5	567,3	546,9	725					
x2	2118,7	2226	1393,4	1453,1	1300	1373,2	1209,7	2712,3					
<i>x</i> 3	19	19,2	20,9	20,8	25	28,6	26,2	20,6					
		Алтайский край											
У	689,4	715,3	827,3	889,6	939,1	1000,8	1048,7	1056,4					
<i>x</i> 1	416,4	432,7	473	529	502	497,8	519,5	610,7					
x2	2711,7	2573,4	2069,5	2192,1	1988,4	1962,9	2056,9	3340,2					
<i>x</i> 3	20,8	18,6	19,1	21,6	24,1	23,9	24,5	24,5					
	Амурская область												
У	346,2	433,4	478,1	493,7	592,1	623,8	645,1	652,5					
<i>x</i> 1	221	227,4	292,7	298,5	277,9	260,3	228	319,6					
x2	926,8	923,6	757	800,9	600,4	438,2	419,5	465,2					
<i>x</i> 3	7	7	6,6	6,3	6,4	6,9	8	8					
-		Хабаровский край											
У	1465,1	1677,4	1926,9	2130,5	2271,2	2551,7	2558,7	2696,2					
<i>x</i> 1	345,7	393,1	418,1	417,7	399,9	393,8	355,8	584					
<i>x</i> 2	1175,3	1159,2	789,2	790,5	678,4	613,5	618,6	1150,3					
<i>x</i> 3	8,2	8,1	7,9	7,8	9,1	9,9	10,2	14,1					
	٠,=	٥, .	. , •		орский край	0,0	,-	, .					
У	1420,5	1703	1829,7	2258,7	2528	2939,3	3425,9	3707,1					
<i>x</i> 1	592,7	694,6	703,2	755,5	614,7	586,4	744,7	1048,7					
x2	2729,6	2861,2	1514,5	1430,1	1459,1	1553,1	1869,9	3342,4					
x3	21,4	25,5	27,1	27,9	30,1	34,1	39,5	39,2					

Источник данных: Росстат, Ростуризм.

Таблица 2. Результаты линейного регрессионного анализа: зависимость доходов КСР от переменных, характеризующих туристический поток.

Table 2. The results of linear regression analysis: dependence of the income of collective accommodation facilities on the variables characterizing the tourist flow.

Регион	Уравнение регрессии	R-squared	Adj. R-squared
Забайкальский край	y = -2,12x1 - 0,43x2 - 55,28x3 + 1533,58	0,92	0,86
Республика Бурятия	y = 0.64x1 - 1.25x2 + 2.64x3 + 1437.07	0,80	0,65
Иркутская область	y = 2,69x1 + 0,11x2 + 29,05x3 - 869,54	0,92	0,86
Амурская область	y = 0.42x1 - 0.49x2 - 1.54x3 + 756.31	0,94	0,90
Хабаровский край	y = 1,10x1 - 1,22x2 + 148,56x3 + 1373,73	0,97	0,95
Приморский край	y = 0.23x1 + 0.01x2 + 122.42x3 - 1459.66	0,97	0,95
Алтайский край	y = 1,50x1 - 0,08x2 + 24,92x3 - 216,62	0,94	0,90

тени», что тоже важно. Среди семи регионов в двух – в Забайкальском крае и Амурской области – коэффициент при переменной x3 оказался отрицательным, при этом в Забайкальском крае – довольно большим по абсолютной величине. Согласно данным табл. 1, общее число мест в КСР в этих регионах существенно меньше, чем в других, а в Забайкальском крае оно еще и сократилось по сравнению с 2009 г. Это также может свидетельствовать об опережающем росте цен на услуги КСР.

В табл. 3 представлены данные по численности КСР в исследуемых регионах. Измерение проводится по числу зарегистрированных организаций в сфере КСР.

В Амурской области в исследованный период произошел самый значительный прирост КСР – 65,6 %. В 2009 г. число КСР здесь было наименьшим среди семи исследованных регионов. Вероятно, в данной области сохранялись ниши для

Таблица 3. Численность КСР.

Table 3. The number of collective accommodation facilities.

Dormon					Годы			
Регион	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Забайкальский край	146	135	142	148	147	151	153	151
Республика Бурятия	211	218	282	301	332	296	334	342
Иркутская область	229	241	271	289	316	346	322	282
Амурская область	96	100	113	119	126	138	149	159
Хабаровский край	172	167	158	175	208	213	224	232
Приморский край	269	312	368	360	347	379	422	292
Алтайский край	250	256	269	338	342	316	393	351

Источник данных: Росстат.

появления новых объектов КСР ввиду небольшой численности имеющихся. Также необходимо принять во внимание фактор приграничного расположения области, регулярное речное сообщение Благовещенска с городом Хэйхэ с населением более 1 млн чел., а следовательно, значительное число туристов из КНР (38,8 тыс. чел. в 2016 г.). Кроме того, в области развивается «космический туризм» на базе космодрома «Восточный». В работе [6] сообщается об организации трансферта групп людей к специальным смотровым площадкам во время запуска космических ракет, которые обеспечены инфраструктурой в виде кафе, гостиниц и мест стоянки.

В Забайкальском крае прирост КСР составил 3,4 %, это самый низкий показательсреди регионов. Однако для развития туристической отрасли в Забайкальском крае предпринимаются определенные меры: включение региона в туристический маршрут «Золотое кольцо Сибири»³, организация экспозиций для «красного туризма»⁴, который вызывает большой интерес посетителей из КНР. В Республике Бурятия и Иркутской области динамичный рост туристического потока обусловлен возрастающей популярностью известного туристического бренда России – озера Байкал как для въездного потока из КНР (вследствие девальвации рубля), так и для внутреннего (кроме девальвации, еще и из-за снижения реальных доходов граждан после 2014 г.) [7–9]. Также следует отметить, что общей характеристикой указанных регионов является этническое разнообразие населения. Этот фактор может существенно расширить палитру туристско-рекреационных ресурсов, способствуя развитию этнокультурного туризма [10].

В Приморском крае существенное внимание уделяется азиатским туристам из сопредельных государств. Для них город Владивосток позиционируется как европейский город в Азии. Это дает результаты – с 2009 по 2016 г. поток иностранных туристов увеличился на 162,7 %. В крае происходит активизация работы по развитию познавательного туризма в охранных зонах заповедников. Например, в Дальневосточном морском биосферном заповеднике поток туристов возрос с 5301 чел. (2011) до 21742 чел. (2016); однако необходимо отметить, что большую часть туристов составляли жители Приморья [11], следовательно, туристический продукт преимущественно является предметом местного спроса.

Во многих странах, в частности в США, Канаде, Мексике, Коста-Рике, Швеции, Германии, Португалии и др., туристические посещения заповедников успешно эволюционировали в полноценную экспортную индустрию, которая служит существенным источником дохода и поддерживает развитие сферы услуг в принимающем регионе [12, 13]. И вместе с тем организация туристической индустрии на природоохранных территориях требует существенных и необходимых трансакционных издержек [14], которые могут включать затраты на организацию туристических маршрутов в охраняемой природной зоне и выдачу лицензий на ее посещение со стороны государственных регулирующих органов и др. Однако при должном уровне организации процессов развития туристического сектора открывается перспектива превышения доходов, полученных от туризма, над величиной трансакционных издержек.

Власти Хабаровского края идут по пути привлечения иностранных туристов. Ведется сотрудничество с властями следующих китайских провинций: Гуандун, Ляонин, Хайнань, Хэбэй, Хэйлунцзян и Шаньдун. В исследуемый период число иностранных туристов увеличилось на 191 %, в том числе ввиду данного факта произошел рост количества КСР на 34,9 %.

На территории Алтайского края в рамках участия в федеральной целевой программе «Развитие внутреннего и въездного туризма в Российской Федерации (2011–2018 гг.)» формируются туристическо-рекреационный кластер «Белокуриха» и автотуристский кластер «Золотые ворота», а также новый кластер – «Барнаул – горнозаводской город», который вошел в указанную ФЦП с 2015 г. В исследованный период (2009–2016) часть объектов указанных кластеров являлись действующими. В работе [15] отмечается развитие санаторно-курортной отрасли региона за счет целебных грязей (Яровое) и радоновых вод (Белокуриха). Успешное развитие туристической отрасли Алтайского края эксперты связывают с продуманной и последовательной региональной политикой.

Чтобы прояснить вопрос о влиянии опережающего роста цен на услуги КСР, в работе также определены потоки доходов, скорректированных с учетом индекса физического объема платных услуг населению (далее – Индекс) для гостиниц и аналогичных средств размещения. Результаты представлены на рис. 4, *а*, *б*. Отметим, что так же, как на рис. 1, где доходы представлены в текущих ценах, рост наблюдается по всем регионам, хотя и в меньших масштабах. Лидерами по приросту по-прежнему ожидаемо являются Республика Бурятия и Приморский край.

Далее представлены результаты регрессионного анализа (табл. 4), где в качестве зависимой переменной взят уже скорректированный доход. Остальные переменные остались прежними. Итак, пусть y^* – доход, полученный коллек-

³Забайкальский край присоединится к маршруту «Золотое кольцо Сибири». URL: http://rgotomsk.com/2018/06/14

⁴Музей истории открылся в Забайкальске. Фоторепортаж. URL: http://zabaikalskadm.ru/index.php/news-region/4-zab-region/3021-2018-08-24-07-22-57

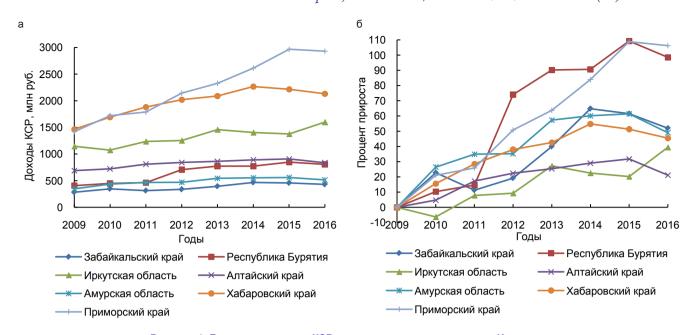


Рисунок 4. Динамика доходов КСР, скорректированных с учетом Индекса. Figure 4. The Income behavior of collective accommodation facilities adjusted to the Index.

тивными средствами размещения (гостиницы, туристические базы и др.), скорректированный с учетом Индекса для гостиниц и аналогичных средств размещения, млн руб.

Эти результаты говорят о том, что степень зависимости скорректированного с учетом роста цен дохода от количества туристов и объемов предоставленных услуг гораздо ниже, чем можно было ожидать, если бы рост был доминирующей причиной отрицательной корреляции для некоторых регионов, выявленной в табл. 2. Для Забайкальского края зависимость от общего числа туристов остается по-прежнему отрицательной, хотя и уменьшилась в полтора раза по абсолютной величине. Отрицательная корреляция выявилась и для Амурской области, и для Приморского края, впрочем, она, как и прежде, остается весьма незначительной по абсолютной величине, так что, вероятно, следует предположить скорее почти нейтральное влияние. Отрицательная зависимость от числа ночевок сохранилась для большинства регионов, хотя и стала меньше по абсолютной величине.

Высокую положительную зависимость доходов от общего числа КСР в регионах, где наблюдается большой туристический поток, – Иркутской области, Бурятии, Хабаровском, Приморском и Алтайском краях – при существенно более низкой (или отрицательной) корреляции с числом ночевок можно объяснить тем, что более развитая инфраструктура и крупные гостиницы имеют больше возможностей для предоставления других услуг, с размещением не связанных: рестораны, бассейны, сауны, спа-салоны и др. Примеры Забайкальского края и Амурской области могут говорить о том (см. данные табл. 2), что недостаточно развитая инфраструктура, напротив, снижает перечисленные возможности.

Заключение

the tourist flow.

Полученные результаты выявили ряд положительных тенденций в развитии туристического сектора на востоке России, несмотря на значительные внешние шоки после 2014 г. Во всех регионах растет доход КСР, даже скорректированный с учетом Индекса. Растут отчисления в бюджетную систему Р Φ – везде, за исключением Забайкальского края, где они сократились, при том, что общее количество туристов несколько выросло с 2009 по 2016 г.

Вместе с тем выявлен ряд парадоксальных тенденций, которые требуют внимания государственных органов, отвечающих за стратегию регионального развития, а также дальнейшего проведения исследований. Отрицательная зависимость доходов КСР от роста туристического потока в регрессионных уравнениях указывает на опасность негативных

Таблица 4. Результаты линейного регрессионного анализа: зависимость доходов КСР, скорректированных с учетом Индекса, от переменных, характеризующих туристический поток.

Table 4. The results of linear regression analysis: dependence of the CAF income, adjusted for the Index, on the variables characterizing

Регион Уравнение регрессии R-squared Adj. R-squared Забайкальский край $y^* = -1,41x1 - 0,19x2 - 59,32x3 + 1245,87$ 0.79 0,63 Республика Бурятия $y^* = 0.84x1 - 0.78x2 + 12.15x3 + 834.75$ 0,82 0,69 0,91 0,84 Иркутская область $y^* = 1,55x1 + 0,01x2 + 14,18x3 + 130,23$ Амурская область $v^* = -0.04x1 - 0.36x2 - 35.8x3 + 990.06$ 0.87 0.76 0,95 0,91 Хабаровский край $y^* = 1,04x1 - 0,97x2 + 56,23x3 + 1860,69$ Приморский край = -0.08x1 - 0.06x2 + 88.15x3 - 288.70,98 0,96 Алтайский край $y^* = 0.87x1 - 0.11x2 + 8.55x3 + 453.3$ 0,97 0,95

⁵ Музей истории открылся в Забайкальске. Фоторепортаж. URL: http://zabaikalskadm.ru/index.php/news-region/4-zab-region/3021-2018-08-24-07-22-57

тенденций в развитии туризма, связанных с теневым сектором. Это обстоятельство подчеркивает также необходимость проверки полноты данных о доходах КСР, представленных на официальных порталах органов государственного управления. На основании этих данных принимаются решения, разрабатываются региональные стратегии, поэтому качество информационного обеспечения является одним из важных факторов, определяющих, в свою очередь, и качество государственного управления.

В частности, результаты говорят о том, что деятельность, не связанная с размещением туристов, приносит высокую долю дохода для КСР в большинстве рассмотренных регионов, несмотря на активизацию туристических потоков на востоке страны, в том числе со стороны Китая – за последние годы число китайских туристов на оз. Байкал стремительно растет. Авторы считают, что с учетом полученных результатов есть достаточно оснований для предположения о растущей доле теневого оборота в туристическом секторе и, соответственно, для срочной разработки мер противодействия этим тенденциям.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Glazyrina I. P., Zabelina I. A. The Silk Road Economic Belt and Green Growth in the East of Russia // Journal of Resources and Ecology. 2016. Vol. 7(5). P. 342–351. https://doi.org/10.5814/j.issn.1674-764x.2016.05.004
- 2. Евстропьева О. В., Корытный Л. М. Рекреационная география и инновации в туризме // География и природные ресурсы. 2015. № 1. C. 198-199.
- 3. Gill D. A., Schuhmann P. W., Oxenford Y. A. Recreational diver preferences for reef fish attributes: economic implications of future changes // Ecological Economics. 2015. Vol. 111, March. P. 48-57. http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2015.01.004
- 4. Margues A., Rodrigues J., Lenzen M., Domingos T. Income-based environmental responsibility // Ecological Economics. 2012. Vol. 84, December. P. 57–65. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2012.09.010
- 5. Daly H., Farley J. Ecological Economics: Principles and Applications. Washington: Island Press, 2003. 450 p.
- 6. Смирнова М. В. Перспективы развития внутреннего и въездного туризма в Амурской области // Научные исследования в сфере общественных наук: актуальные теории и концепции: сборник науч. трудов по материалам І Междунар. науч.-практ. конф. М., 2018. С. 54–80. 7. Афанасьев О. Е., Корытный Л. М., Евстропьева О. В. «Байкал – голубое око планеты»: географические аспекты развития туризма в Прибайкалье // Современные проблемы сервиса и туризма. 2018. Т. 12, № 3. С. 5–6.
- 8. Саранча М. А., Очкасова И. С. Состояние туристской маршрутной сети и программ экологической тематики Иркутской области // Сервис plus. 2017. Т. 11. № 4. С. 49–54.
- 9. Хандажапова Л. М., Лубсанова Н. Б. Экономические, экологические и социальные проблемы развития туризма на Байкале // ЭКО. 2013. № 3 (465). C. 132-137.
- 10. Krasnoyarova B. A., Garms E. O., Indyukova M. A. The ethnocultural component of tourism development in the Altai Republic // Geography and Natural Resources. 2017. Vol. 38, № 2. P. 165–172. https://doi.org/10.1134/S187537281702007X
- 11. Деркачева Л. Н., Куликов А. П. Биоразнообразие заповедников Приморского края основа развития познавательного туризма // Наука и туризм: стратегии взаимодействия. 2017. № 5. С. 37–49.
- 12. Hjerpe E. Outdoor Recreation as a Sustainable Export Industry: A Case Study of the Boundary Waters Wilderness // Ecological Economics. 2018. Vol. 146, April. P. 60-68. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.10.001
- 13. Istomina E. A., Luzhkova N. M., Khidekel' V. V. Birdwatching tourism infrastructure planning in the Ria Formosa natural park (Portugal) //
- Geography and Natural Resources. 2016. Vol. 37, № 4. Р. 371–378. https://doi.org/10.1134/S1875372816040120
 14. Глазырина И. П., Лавлинский С. М. Трансакционные издержки и проблемы освоения минерально-сырьевой базы ресурсного региона // Журнал новой экономической ассоциации. 2018. № 2 (38). С. 121–143.
- 15. Веселова Э. Ш. Медицинский туризм бизнес на путешествиях с пользой для здоровья // ЭКО. 2016. № 3 (501). С. 142–164.

Статья поступила в редакцию 10 сентября 2018 г.

УДК 338.488

Discrepancies of border tourism in the east of Russia

Irina Petrovna GLAZYRINA*. Aleksandr Evgen'evich PESHKOV

Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology of the Siberian Branch of RAS, Chita, Russia

Relevance of the study of the development of tourism in the regions of the eastern part of the country is due to its high potential for environmentally friendly diversification of the economy of these territories experiencing significant environmental pressure due to natural resource orientation. High environmental quality is a condition for the sustainable development of this sector; it creates an additional economic motivation of the business community for its preservation, which corresponds to the basic principles of ecological economics.

Purpose of the work is to obtain quantitative estimates of the influence of various factors on the economic results within the tourism sector related to the income of collective accommodation facilities (CAF).

Methodology. To estimate the influence of various factors on the dynamics of economic indicators, linear regression analysis was used using the STATA software resources.

Results obtained have revealed a number of positive trends in the development of the tourism sector in eastern Russia, despite significant external shocks after 2014. In all regions, the income of CAF increases adjusted to the index of the physical quantity of services paid to the population. Deductions to the budgetary system of the Russian Federation are growing everywhere, except for the Trans-Baikal Territory (here they decreased), while the total number of tourists increased slightly from 2009 to 2016. At the same time, a number of controversial trends were revealed that require the attention of public authorities responsible for the strategy of regional development. The results show that non-tourist activities bring a high income share for CAF in most of the regions examined, despite the increase in tourist flows in the east of the country. In recent years, the number of Chinese tourists in the territory of Lake Baikal is growing rapidly.

Conclusions. The authors believe that on the basis of the obtained results there are enough grounds for the assumption about the growing share of shadow turnover in the tourism sector and, accordingly, for the urgent development of measures to counter these trends.

Keywords: tourism industry, regression analysis, income behavior, regional policy.

REFERENCES

- 1. Glazyrina I. P., Zabelina I. A. 2016, The Silk Road Economic Beltand Green Growthin the East of Russia. Journal of Resources and Ecology, vol. 7(5), pp. 342-351. https://doi.org/10.5814/j.issn.1674-764x.2016.05.004
- 2. Evstropyeva O.V., Korytny L. M. 2015, Recreational geography and innovation in tourism. Geografiya i prirodnyye resursy [Geography and Natural Resources], no. 1, pp. 198-199. (In Russ.)
- 3. Gill D. A., Schuhmann P. W., Oxenford Y. A. 2015, Recreational diver preferences for reef fish attributes: economic implications of future changes. *Ecological Economics*, vol. 111, March, pp. 48–57. http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2015.01.004

 4. Marques A., Rodrigues J., Lenzen M., Domingos T. 2012, Income-based environmental responsibility. *Ecological Economics*, vol. 84, December,
- pp. 57-65. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2012.09.010
- 5. Daly H., Farley J. 2003, Ecological Economics: Principles and Applications. Washington: Island Press, 450 p.
 6. Smirnova M. V. 2018, *Perspektivy razvitiya vnutrennego i v"yezdnogo turizma v Amurskoy oblasti* [Prospects for the development of domestic and inbound tourism in the Amur region]. Research in the social sciences: current theories and concepts: collection of works based on the proceedings of I International scientific conference. Moscow, pp. 54-80.
- 7. Afanasyev O. E., Korytny L. M., Evstropyeva O. V. 2018, Baikal is a blue eye of the Earth: geographical aspects of tourism development in the Baikal region. Sovremennyye problemy servisa i turizma [Service and Tourism: Current Challenges], vol. 12, no. 3, pp. 5–6. (In Russ.)
- 8. Sarancha M. A., Ochkasova I. S. 2017, The state of the tourist route network and programs on environmental issues of the Irkutsk region. *Servis plus* [Service Plus Scientific Journal], vol. 11, no. 4, pp. 49–54. (*In Russ.*)

 9. Khandazhapova L. M., Lubsanova N. B. 2013, Economic, environmental and social problems of tourism development in the Baikal region. *EKO*
- [ECO journal], no. 3 (465), pp. 132-137. (In Russ.)
- 10. Krasnoyarova B. A., Garms E. O., Indyukova M. A. 2017, The ethnocultural component of tourism development in the Altai Republic. Geography and Natural Resources, vol. 38, no. 2, pp. 165–172. https://doi.org/10.1134/S187537281702007X

 11. Derkacheva L. N., Kulikov A. P. 2017, Biodiversity of conservancy areas in the Primorsky Krai is the basis for the development of tourism.
- Nauka i turizm: strategii vzaimodeystviya [Science and Tourism: Interaction Strategies], no. 5, pp. 37-49. (In Russ.)
- 12. Hjerpe E. 2018, Outdoor Recreation as a Sustainable Export Industry: A Case Study of the Boundary Waters Wilderness. Ecological Economics, vol. 146, April, pp. 60-68. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.10.001
- 13. Istomina E. A., Luzhkova N. M., Khidekel' V. V. 2016, Birdwatching tourism infrastructure planning in the Ria Formosa natural park (Portugal).
- Geography and Natural Resources, vol.37, no. 4, pp. 371–378. https://doi.org/10.1134/S1875372816040120
 14. Glazyrina I. P., Lavlinsky S. M. 2018, Transaction costs and problems of development of the mineral resource base of the resource region. Zhurnal novoy ekonomicheskoy assotsiatsii [The Journal of the New Economic Association], no. 2 (38), pp. 121-143. (In Russ.)
- 15. Veselova E. Sh. 2016, Health tourism traveling business with health benefits. EKO [ECO journal], no. 3 (501), pp. 142–164. (In Russ.)

The article was received on September 10, 2018



Вопросы создания инновационной мотивационной среды в системе профессионального образования

Константин Васильевич РОЧЕВ, Сергей Алексеевич ПОЛИЩУК, Дмитрий Сергеевич МАРЧЕНКО

Ухтинский государственный технический университет, Россия, Республика Коми, Ухта

Актуальность. Оценка и стимулирование труда являются одной из важнейших составляющих управления, поскольку от него в наибольшей степени зависит результативность работы и конкурентоспособность организации в целом.

Шель работы: провести обзор методик оценки результатов трудовой деятельности с позиций их применения в системе профессионального образования и реализации в индексной системе оценки труда.

Задачи: сформировать системный подход к стимулированию вузовского коллектива, предложить и оценить индексную методику измерения результатов трудовой деятельности на основе системного подхода, исследовать работу данных моделей при функционировании информационных систем для отдельных сегментов коллектива вуза, определить основные направления совершенствования разработанной системы стимулирования на основе результатов ее апробации и анализа поведения трудового и студенческого коллективов в условиях функционирования данной системы. **Предмет:** оценка трудовой деятельности.

Объект: трудовой и студенческий коллективы в сфере профессионального образования.

Результаты и их применение. Рассмотрены основные современные подходы и теории мотивации труда, отмечено их воплошение при реализации системы стимулирования в среде профессионального образования. Представлены этапы формирования мотивационной среды в университетском комплексе и опора стимулирования на ключевые принципы системного подхода и теорий мотивации труда. Описано применение разработанной автоматизированной системы к оценке деятельности и стимулированию студентов и преподавателей в сфере высшего и среднего профессионального образования. Указаны ключевые возможности, предоставляемые разработанной системой.

Выводы. Значение исследования состоит в предложенных подходах и методах оценки результатов деятельности различных сегментов коллектива высших учебных заведений. Дополнительную актуальность исследованию придает создание информационного комплекса, состояшего из систем стимулирования преподавателей, сотрудников и студентов.

Ключевые слова: индексная система, индексно-рейтинговая система, стимулирование труда, ключевые показатели эффективности, материальное стимулирование, оценка качества в вузе, информатизация образования, университет.

Ведение
Стимулирование труда является одной из важнейших составляющих управления, поскольку от этого в наибольшей степени зависят как повышение трудовой активности конкретного члена коллектива, так и результаты деятельности и конкурентоспособность любой организации в целом. Высшие учебные заведения, естественно, не являются исключением, поскольку в современных условиях важности оценки и стимулирования труда в сфере образования уделяется особое внимание. Это иллюстрируется реализуемой в масштабах страны системой мониторинга эффективности вузов, проводимой Минобрнауки РФ, акцентами на независимую оценку качества образования в новом федеральном законе «Об образовании в Российской Федерации» и многими другими фактами.

Вопросы мотивации рассматривались преимущественно с XIX в. и представлены большим количеством теорий и методик с точек зрения разных наук: экономики, психологии, социологии, педагогики. Тем не менее проверенные веками методы, такие как «кнут и пряник» (X/Y), используются не менее широко. На текущий момент можно выделить ряд основных теорий, применяемых для мотивации персонала, среди которых:

- 1) содержательные теории мотивации, показывающие мотивацию с точки зрения потребностей человека [1 и др.];
- 2) процессуальные теории мотивации, рассматривающие влияние мотивирующих факторов на человека [2, 3 и др.];
- 3) системы грейдов, делающие карьерный рост и уровень условно-постоянной части заработной платы более прозрачными [4];
- 4) сбалансированные системы показателей и ключевые показатели эффективности, обеспечивающие надбавки к оплате труда за достижения в областях, совпадающих с целями компании [5, 6].

Для повышения результативности работы вуза в нем должна функционировать соответствующая система оценки и стимулирования. Кроме того, в соответствии с Приказом Минтруда РФ № 167н «Об утверждении рекомендаций по оформлению ... эффективного контракта» (Об утверждении рекомендаций по оформлению трудовых отношений с работником государственного (муниципального) учреждения при введении эффективного контракта: приказ Минтруда России от 26.04.2013 № 167н. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_149028) для каждого работника бюджетных организаций должны быть определены показатели оценки результативности работы, от которых будет зависеть размер переменной части оплаты его труда. Наравне с необходимостью стимулирования трудового коллектива явно актуальным является материальное стимулирование учебной и внеучебной деятельности студентов (О порядке совершенствования стипендиального обеспечения обучающихся в федеральных государственных образовательных учреждениях профессионального образования: постановление Правительства РФ от 18.11.2011 г. № 945), следовательно, имеет смысл рассматривать эти процессы в комплексе.

Имеет место и большое количество систем симулирования, используемых в вузах [7–11 и др.], большинство из которых имеют ряд недостатков (в том числе существенных), а именно:

- 1) СМС охватывает, как правило, только один сегмент коллектива (профессорско-преподавательский состав ППС);
 - 2) система показателей ориентирована на конкретный вуз и неприменима к вузам с другой спецификой;
- 3) показатели «взвешены» на основании экспертных опросов, но ввиду дефицита компетентных экспертов в данной области знаний оценки носят ненадежный характер;
 - 4) отсутствуют надежные фильтры, гарантирующие достоверность вводимых в СМС данных;
 - 5) консерватизм СМС ни система весов, ни величина стимфонда не реагируют на динамику результатов;
 - 6) непрозрачность системы оценки для коллектива.

Таким образом, была необходима разработка полноценной, эффективной системы материального стимулирования в вузе, свободной от указанных недостатков.

В своей статье ученые РЭУ им. Плеханова Л. П. Гончаренко и М. А. Пономарев отмечают некоторые другие недостатки существующих систем рейтингования вузов и в вузах и подчеркивают актуальность формирования рейтинга студентов и выпускников для оценки как самих обучающихся, так и качества работы образовательных организаций в целом [12].

Результаты

Формирование системы мотивации труда в сфере профессионального образования на основе интеграции известных теорий и подходов

С 2006 по 2016 г. в Ухтинском государственном техническом университете (УГТУ) проведен ряд исследований, целью которых была разработка комплекса методик оценки качества труда и систем стимулирования в сфере профессионального образования, которые позволяют обеспечить соответствие вознаграждения уровню достигнутых результатов и формирование соревновательной среды, приводящей к повышению качества подготовки специалистов¹.

В ходе работ по формированию системы стимулирования и оценки труда в УГТУ были пройдены такие этапы, как:

- 1) изучение текущего состояния различных сегментов коллектива вуза (в том числе преобладающего типа мотивации), которое позволило выявить эффективные факторы для мотивации коллектива учебного заведения [13];
- 2) формирование перечней показателей оценки деятельности членов различных сегментов коллектива образовательной организации [14];
- 3) разработка методик и алгоритмов вычисления рейтинга, индексов и поощрительных выплат для различных сегментов коллектива вуза (здесь, с точки зрения создания конкурентной среды в сфере профессионального образования, наибольший интерес представляют методики оценки преподавателей и обучающихся, разработанные с применением единых подходов и принципов [15]), стимулирование работников вуза, не занятых в учебном процессе, реализовано с применением другого подхода в виде отдельного программного продукта, его в данной статье подробно рассматривать не будем [16];
- 4) разработка автоматизированной информационной системы стимулирования коллектива вуза, включающей системы расчета рейтинга, индексов и стимулирующих выплат, формирования портфолио за весь период обучения и работы и получения детальной статистики по собранным системой данным [15, 16];
- 5) внедрение систем стимулирования и изучение распределения результатов работы и стратификации членов коллективов под их воздействием;
- 6) разработка методики измерения активности (интенсивности конкуренции) для количественной оценки степени воздействия систем стимулирования;
- 7) анализ результатов функционирования систем стимулирования и определение путей их дальнейшего совершенствования.

При проектировании и реализации системы были полностью воплощены основные принципы системного подхода к оценке деятельности и стимулированию коллектива, такие как [17]:

- 1) принцип целостности рассмотрение системы как единого целого и в то же время как подсистемы для вышестоящих уровней;
 - 2) принцип целеполагания: цель, определяющая поведение системы, всегда задается надсистемой;
- 3) *принцип функциональности* совместное рассмотрение структуры и функции с приоритетом функции над структурой;
- 4) принцип единства (связности, эмерджентности) совместное рассмотрение системы как целого и как совокупности частей, при этом система имеет свойства, не выводимые из известных свойств ее элементов и способов их соединения;
 - 5) принцип развития живуча только развивающаяся система;
- 6) принцип иерархичности наличие множества (по крайней мере двух) элементов, расположенных на основе подчинения элементов низшего уровня элементам высшего уровня;
 - 7) принцип многообразия: чем многообразнее система, тем она устойчивее;
 - 8) принцип отсутствия лишнего: лишний элемент системы погибает;
- 9) принцип слабой связи: связи между элементами системы должны быть необходимо прочными для сохранения целостности системы, но достаточно слабыми для обеспечения ее живучести;
- 10) принцип отрицательной обратной связи: реакция системы на воздействие должна минимизировать отклонение системы от траектории к цели.

На основе универсальной декомпозиции глобальной цели вуза определены <u>Разделы и подразделы системы</u> – достаточно универсальная структура. Как практическое воплощение системного *принципа функциональности*, показатели Индексной системы (ИС) в разделах распределены по четырем универсальным категориям (потенциал, активность,

результат, результат экстра-класса), многие из показателей градуированы. Формирование набора показателей и оценка их весомости производились с помощью различных статистических средств и методов принятия решений.

Таким образом, логичным является тот факт, что на практике структура и наполнение систем оценки ППС и обучающихся тесно увязаны между собой, тем самым реализован классический принцип координации и системный принцип связности. Проектирование информационной системы выполнено как единое целое на базе системного принципа единства.

Принцип развития реализуется за счет открытости Индексной системы стимулирования (прозрачность и возможность совершенствования), а также модульной архитектуры (модули легче корректировать, чем всю систему сразу). Кроме того, на протяжении всего периода функционирования проводилось постоянное совершенствование как организационной, так и технической стороны системы.

Иерархичность и *многообразие* системы стимулирования базируется на пересечении иерархии структурных подразделений вуза с иерархией пунктов ИС от раздела до градации. Показатели оценки трудовой деятельности в системе стимулирования со временем уточняются, а устаревшие и некоторые неиспользуемые удаляются, за счет чего обеспечивается *принцип отсутствия лишнего*. Система весов разделов динамически корректируется на основе априорно-апостериорного подхода с *применением обратной связи*.

Универсальность достигается за счет введения двух обобщенных характеристик деятельности членов трудового коллектива [18]: индекса лидерства – работа «вглубь» – и индекса гармонии – работа «вширь», универсальной системы градаций показателей и опоры на декомпозицию универсальной глобальной цели вуза. Благодаря этому ИС применима в вузах любого масштаба, профиля и географии, в том числе и в зарубежных.

Системный подход к стимулированию предполагает комплексное воздействие на каждого члена коллектива вуза с учетом организационной структуры. Информационной базой для стимулирования выступает Индексная система сравнительной оценки результатов деятельности каждого члена коллектива за отчетный период. Модульность реализации автоматизированной системы и применение сервисных технологий обеспечивают принцип слабой связи. Подсистемы стимулирования, разработанные для каждого сегмента трудового коллектива вуза, в полной мере базируются на приведенных принципах системного подхода.

Далее вернемся к другим фундаментальным подходам к мотивации индивидуумов и коллектива в целом. Рассматривая теории потребностей, можно представить работу ИС-продукта, создаваемого в рамках описываемого исследования, – на каждом из уровней пирамиды потребностей по Маслоу [19]: основным воздействующим механизмом является материальное стимулирование (для удовлетворения потребностей физиологического уровня) – распределение поощрительных выплат пропорционально достигнутому результату. Потребность в безопасности осуществляется за счет того, что члены коллектива, находящиеся вверху индекс-листа, имеют больший уровень защищенности (например, от увольнения). Уровень принадлежности определяется организационной культурой вуза, влиянием каждого члена коллектива на индекс кафедр и факультетов, моральными стимулами, которые опираются на результаты расчетов ИС. Потребности в уважении и самовыражении отражаются непосредственно в занимаемой позиции в индекс-листе, результате относительно лидера по вузу или в сопоставлении с усредненным членом коллектива.

Если рассматривать высшие потребности по Мак-Клелланду², то потребность в причастности в рамках ИС заключается как в повышении индексной позиции своих кафедры и факультета каждым преподавателем и студентом, так и в воздействии на результаты деятельности вуза в целом. Потребность в успехе может выражаться непосредственно в попадании в топ-лист ИС. А потребность во власти осуществляется за счет выдвижения представителей коллектива, имеющих высокие индексные показатели на руководящие позиции.

Ввиду теорий ожидания К. Левина, предпочтения и ожидания В. Врума [3], справедливости С. Адамса и комплексной теории Портера-Лоулера³, ИС предназначена в первую очередь для оценки результатов деятельности каждого члена коллектива с высоким уровнем адекватности и, как следствие, справедливости этого вознаграждения. По двухфакторной теории Ф. Герцберга основным объектом действия ИС является воздействие на факторы, мотивирующие к работе. А по теории X и Y Д. Мак-Грегора система нацелена в первую очередь на модель Y.

С позиций системы грейдов ИС является источником данных для принятия решений о выдвижении того или иного сотрудника или преподавателя на определенную должность или звание для продвижения по карьерной лестнице. В то же время ИС, по сути, является набором КРІ для вуза и методикой расчета сбалансированных показателей, нацеленной на гармонизацию деятельности коллектива университета и достижение им аккредитационных и стратегических показателей

Конечным итогом проведенного исследования явилась Индексная система (ИС) – информационный комплекс учета и сравнительной количественной оценки результатов деятельности преподавателей и студентов для построения общевузовского рейтинга и вычисления стимулирующих выплат [15].

Исследование результатов внедрения системы мотивации

Первая версия Индексной системы стимулирования профессорско-преподавательского состава (ППС) была внедрена в УГТУ в 2007 г. В 2011 г. разработана новая версия системы и проведена работа по охвату ею колледжей г. Ухты. С 2013 г. на основе опыта оценки и стимулирования преподавателей была разработана и внедрена система оценки студенческого коллектива (рис. 1), что позволило создать единую среду мотивации активной научно-инновационной и иной деятельности, повысить качество обучения и другие важные показатели университетского комплекса в целом.

На рис. 2 приведено изменение некоторых количественных показателей деятельности штатных преподавателей Ухтинского университета за первые пять лет внедрения ИС. А на рис. 3 – публикационная активность вуза по данным

²Теория приобретенных потребностей Дэвида Мак-Клелланда / Профессиональные системы управления. URL: http://www.pragmatist.ru/motivaciya-truda/teoriya-priobretennyx-potrebnostej-d-makklellanda.html

³Ямпольская Д., Зонис М. Процессуальные теории мотивации. Модель Портера-Лоулера / Центр креативных технологий. URL: http://www.inventech.ru/lib/management/management-0029

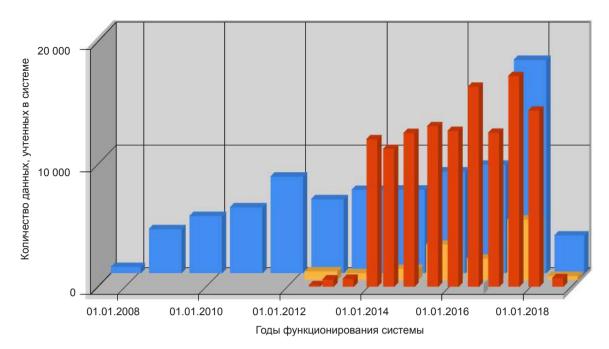


Рисунок 1. Количество данных, внесенных в Индексную систему за время ее функционирования: дальний ряд – ППС вуза (по учебным годам), средний ряд – преподаватели колледжей (по учебным годам), ближний ряд – студенты (по семестрам). Figure 1. The amount of data entered into the Index system during its operation: the far row is the faculty members (by academic year), the middle row is the college teachers (by academic year), the closest row is students (by semesters).

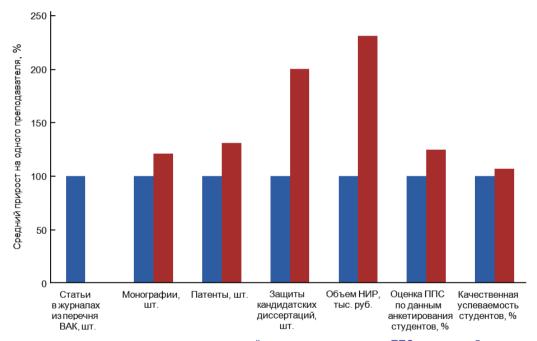


Рисунок 2. Изменение некоторых количественных показателей деятельности штатных ППС за первые 5 лет внедрения ИС. Figure 2. Changes in some quantitative indicators of the performance of full-time faculty members in the first 5 years of the implementation of the Index System.

Российского индекса научного цитирования (РИНЦ)⁴. Эти данные немного отличаются от фактических результатов штатных ППС УГТУ ввиду учета внешних совместителей и особенностей индексирования публикаций в РИНЦ, однако общие тенденции довольно похожи. На рис. 3 можно заметить скачок активности в 2009 г., последовавший за внедрением новой Индексной системы стимулирования (до нее стимулирование ППС осуществлялось в виде более традиционного рейтинга). Однако далее последовало «насыщение» и некоторый спад по причине повышения весов других ИС относительно научной деятельности, в 2012 г. вес научного раздела был повышен относительно других, что вызвало подъем публикационной активности, а с 2013 г. акцент был смещен на публикации, индексируемые в зарубежных базах, ввиду чего публикаций в журналах перечня ВАК стало несколько меньше.

⁴ Об утверждении рекомендаций по оформлению трудовых отношений с работником государственного (муниципального) учреждения при введении эффективного контракта: приказ Минтруда России от 26.04.2013 № 167н. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_149028

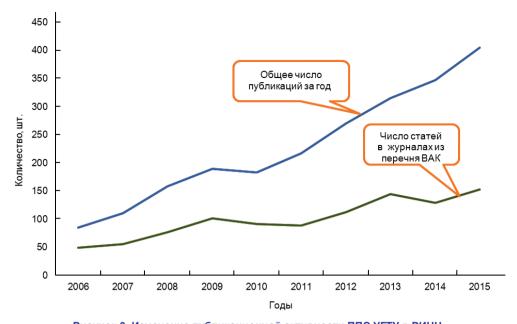


Рисунок 3. Изменение публикационной активности ППС УГТУ в РИНЦ.
Figure 3. Changes in the publication activity of faculty members of the Ukhta State Technical University in the Russian Science Citation Index database.

Заключение

Обобщая все изложенное, можно сделать вывод, что механизм ИС позволяет обеспечить:

- 1) материальное стимулирование:
- рассчитывается размер надбавок и других поощрительных выплат;
- обеспечивается сбор и анализ данных для продвижения сотрудников и будущих выпускников по карьерной лестнице;
- 2) моральное стимулирование:
- построение общевузовского сравнительного рейтинга за определенный период (индекс-листа) с предоставлением всех учтенных при расчетах результатов, обеспечивающих прозрачность индекс-листов;
- награждение лидеров по разделам ИС по итогам года дипломами, памятными подарками, размещением на досках почета и в СМИ.

Конечно, необходимым является и моральное стимулирование, основанное на системе организационной культуры вуза, которая может быть построена отдельно, однако в сочетании с системой оценки, имеющей формализованные критерии (которые для материального стимулирования необходимы), позволяет достичь более существенных результатов [20–23].

Подводя итоги, авторы отмечают, что значение исследования состоит в предложенных подходах и методах оценки результатов деятельности различных сегментов коллектива высших учебных заведений, в расширении научных представлений о мотивации, стимулировании труда и в предложенной методике оценки уровня конкуренции. Особую актуальность исследованию придает создание информационного комплекса, состоящего из систем стимулирования преподавателей, сотрудников и студентов, обеспечивающих следующие преимущества:

- 1) систематизация поощрения всех сегментов коллектива вуза;
- 2) повышение активности членов коллектива вуза, особенно в инициативной и инновационной сферах, привлечение их к наиболее актуальным направлениям деятельности учебного заведения;
 - 3) сбор статистики для оперативного использования, оценки и аккредитации вуза;
- 4) получение сведений о структуре деятельности как отдельных членов коллективов, так и кафедр, факультетов, институтов, вуза в целом;
- 5) отслеживание *траектории* движения каждого члена коллектива в многомерном пространстве за весь период обучения или работы;
- 6) возможность сравнения с вузами-партнерами в случае функционирования общей информационной системы оценки деятельности преподавателей или студентов;
- 7) оценка работы для назначения стимулирующих выплат в соответствии с новой системой оплаты труда и эффективным контрактом;
- 8) облегчение выбора кандидатов на назначение повышенных стипендий, предоставление инструмента, помогающего в подборе кандидатов на назначение именных стипендий, направление на практики и стажировки в ведущие предприятия;
 - 9) формирование приложения-портфолио к диплому выпускника вуза для трудоустройства в крупные компании;
 - 10) повышение открытости учебного процесса для предприятий-партнеров вузов, использующих подобную систему.

Авторы планируют в дальнейшем продолжить анализ накопленного опыта и практических аспектов реализации описанной в статье Индексной системы с учетом возможности масштабирования и тиражирования проекта в различных учебных заведениях страны и других сферах применения подобных инновационных мотивационных решений.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Alderfer C. P. An Empirical Test of a New Theory of Human Needs // Organizational Behaviour and Human Performance. 1969. Vol. 4, issue 2. P. 142-175. https://doi.org/10.1016/0030-5073(69)90004-X
- 2. Herzberg F. I. One more time: How do you motivate employees? // Harvard Business Review. 1987. Sep/Oct. Vol. 65, issue 5. P. 109-120. URL: https://pdfs.semanticscholar.org/ca2a/a2ae02ac5b738b55b12b7324fac59571b1c1.pdf
- 3. Vroom V. H., MacCrimmon K. R. Toward a stochastic model of managerial careers // Administrative Science Quarterly. 1968. Vol. 13, № 1. 26-46. https://doi.org/10.2307/2391260
- 4. Ильясов Ф. Н. Тарифная сетка, система грейдов на основе закона Вебера // Мониторинг общественного мнения: экономические и социальные перемены. 2012. № 6(112). С. 128-135. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=18327955
- 5. Каплан Р. С., Нортон Д. П. Сбалансированная система показателей. От стратегии к действию. М.: ЗАО «Олимп-Бизнес», 2003. 304 с.
- 6. Клочков А. К. КРІ и мотивация персонала: полный сборник практических инструментов. М.: Эксмо, 2010. 170 с. ISBN 978-5-699-37901-9.
- 7. Рабинович М. И., Степанова Е. Ю. О разработке типологии рейтинговых оценок деятельности преподавателей и кафедр для системы морального и материального стимулирования // Университетское управление: практика и анализ. 2009. № 3(61). С. 23–28. URL: https:// elibrary ru/item.asp?id=13083945
- 8. Агафонова Е. А. Взаимосвязь оценки качества образования в вузе и стимулирования учебной деятельности студентов // Вестник ВятГГУ. 2008. № 2-1. С. 161–167. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=11686675

 9. Гривенная Е. Н., Старостенко И. Н. Математическая модель рейтинговой оценки профессиональной деятельности преподавателя
- высшего учебного заведения // Юристъ-Правоведъ. 2011. № 5(48). С. 7-12. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=18877994
- 10. Купера А. В. Стимулирование деятельности преподавателей вуза // Вестник ТГЭУ. 2005. № 3. С. 113–124. URL: https://elibrary.ru/item. asp?id=11779941
- 11. Рыбакова Л. Е. Особенности и последствия мотивации и стимулирования труда в высшей школе в условиях ее инновационного развития // Актуальные проблемы социально-экономического развития России. 2010. № 4. С. 94–101. ÚRL: https://elibrary.ru/item.as-
- 12. Гончаренко Л. П., Пономарев М. А. Разработка методики рейтинга студентов (выпускников) вуза как средства стимулирования сотрудничества вузов и коммерческих организаций // Экономический анализ: теория и практика. 2009. № 3(132). С. 8–14. URL: https:// elibrary.ru/item.asp?id=11675314
- 13. Antonelly C. Knowledge exhaustibility and Schumpeterian growth // The Journal of Technology Transfer. 2018. Vol. 43, issue 3. P. 779–791. http://dx.doi.org/10.1007/s10961-017-9599-3
- 14. Coccia M. Optimization in R&D intensity and tax on corporate profits for supporting labor productivity of nations // The Journal of Technology Transfer. 2018. Vol. 43, issue 3. P. 792–814. https://doi.org/10.1007/s10961-017-9572-1
- 15. Рочев К. В. Обзор основных результатов формирования эффективной системы материального стимулирования коллектива вуза // Ресурсы Европейского Севера. Технологии и экономика освоения. 2015. № 1. С. 68-83. URL: http://resteo.ru/rochev-1
- 16. Рочев К. В. Информационная система стимулирования сотрудников вуза // Университетское управление: практика и анализ. 2015. № 2(96). C. 74-84. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=24054002
- 17. Эмексузян А. Р. Синтез методов принятия решений в управлении инновационными процессами // Ресурсы Европейского Севера. Технологии и экономика освоения. 2015. № 1. С. 84–90. URL: http://resteo.ru/emeksuzyan-1
- 18. Данилов Г. В. Применение обобщенных характеристик деятельности ППС при формировании в университете системы материального стимулирования // Управление экономическими системами: электронный научный журнал. 2013. № 5(53). URL: http://uecs.ru/instrumentalnii-metody-ekonomiki/item/2159-2013-05-28-05-53-01
- 19. Macnoy A. Мотивация и личность. СПб.: Eвразия, 1999. 478 c. URL: http://psylib.org.ua/books/masla01/index.htm
- 20. Blume-Kohout M. E. Why are some foreign-born workers more entrepreneurial than others? // The Journal of Technology Transfer. 2016. Vol. 41, issue 6. P. 1327–1353. https://doi.org/10.1007/s10961-015-9438-3
- 21. Schillo R. S. Research-based spin-offs as agents in the entrepreneurial ecosystem // The Journal of Technology Transfer. 2018. Vol. 43, issue 1. P. 222-239. https://doi.org/10.1007/s10961-016-9484-5
- 22. Chandrashekhar Iyer K., Banerjee P. S. Facilitators and inhibitors in sector wide technology transfer projects in developing economies: an empirical study // The Journal of Technology Transfer. 2018. Vol. 43, issue 1. P. 172-197. https://doi.org/10.1007/s10961-015-9456-1
- 23. Mendonça J., Grimpe C. Skills and regional entrepreneurship capital formation: a comparison between Germany and Portugal // The Journal of Technology Transfer. 2016. Vol. 41, issue 6. P. 1440-1456. https://doi.org/10.1007/s10961-015-9444-5

Статья поступила в редакцию 3 июля 2018 г.

УДК 331.21:004.021

https://doi.org/10.21440/2307-2091-2018-4-135-142

Questions on creating an innovative motivational environment in the vocational training system

Konstantin Vasil'evich ROCHEV*. Sergey Alekseevich POLISHCHUK, **Dmitriy Sergeevich MARCHENKO**

Ukhta State Technical University, Ukhta, Republic of Komi, Russia

Relevance. Evaluation and stimulation of labor are one of the most important components of management, since the effectiveness of work and competitiveness of the organization as a whole depend on them to the greatest extent.

Purpose of the work. The aim is to review some methods of evaluating the results of labor activity from the standpoint of their application in the vocational training system and implementation in the index system of labor assessment.

Tasks. To form a systematic approach to stimulating a university team, propose and evaluate an index method of measuring work results based on a system approach, investigate the work of these models in the operation of information systems for individual segments of the university, determine the main directions for improving the developed incentive system based on the results of its testing and analysis of the behavior of personnel and student groups in the conditions of operation of this system.

Subject: working activity assessment.

Study object: personnel and student groups in the field of vocational education.

Results and their application. The main modern approaches and theories of labor motivation are considered, their implementation when developing the incentive system in the professional education is noted. The stages of fomation of the motivational environment in the university complex and the support of incentives on the key principles of the systems approach and theories of labor motivation are presented. The application of the developed automated system to the assessment of activities and stimulation of students and teachers in the field of higher and secondary vocational education is described. The key features provided by the developed system are indicated.

Conclusion. The value of the research lies in the proposed approaches and methods for evaluating the performance of various segments of the higher education institutions. Additional relevance to the research is given by the creation of an information complex consisting of incentive systems for teachers, staff and students.

Keywords: index system, index-rating system, labor incentives, key performance indicators, financial incentives, quality assessment at the university, informational support of education, university.

REFERENCES

- 1. Alderfer C. P. 1969, An Empirical Test of a New Theory of Human Needs. Organizational Behaviour and Human Performance, vol. 4, issue 2, pp. 142-175. https://doi.org/10.1016/0030-5073(69)90004-X
- 2. Herzberg F. I. 1987, One more time: How do you motivate employees? Harvard Business Review. Sep/Oct, vol. 65, issue 5, pp. 109–120. URL: https://pdfs.semanticscholar.org/ca2a/a2ae02ac5b738b55b12b7324fac59571b1c1.pdf
- 3. Vroom V. H., MacCrimmon K. R. 1968, Toward a stochastic model of managerial careers. Administrative Science Quarterly, vol. 13, no. 1, pp. 26-46. https://doi.org/10.2307/2391260
- 4. Ilyasov F. N. 2012, Schedule of charges, the system of grades based on the law of Weber. Monitoring obshchestvennogo mneniya: ekonomicheskiye i sotsial'nyye peremeny [Monitoring of public opinion: economic and social changes journal], no. 6 (112), pp. 128-135. (In Russ.) URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=18327955
- 5. Kaplan R. S., Norton D. P. 2003, Sbalansirovannaya sistema pokazateley. Ot strategii k deystviyu [The balanced scorecard. Translating strategy
- into action]. Moscow, 304 p. https://www.pwc.ru/ru/training/assets/balanced-scorecard.pdf
 6. Klochkov A. K. 2010, KPI i motivatsiya personala: polnyy sbornik prakticheskikh instrumentov [KPI and staff motivation: complete collection of practical tools]. Moscow, 170 p. ISBN 978-5-699-37901-9.
- 7. Rabinovich M. I., Stepanova E. Yu. 2009, Design of typology of rating conformably to the evaluation of lecturer's activities and departments for the system of gratuity and moral incentive of professional activity at the university. Universitetskoye upravleniye praktika i analiz [Journal University Management: Practice and Analysis], no. 3 (61), pp. 23–28. (In Russ.) URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=13083945
- 8. Agafonova E. A. 2008, Interrelation of estimation of the quality of education in the university and stimulation student learning activities. Vestnik vyatskogo gosudarstvennogo gumanitarnogo universiteta [Herald of Vyatka State University], no. 2-1, pp. 161-167. (In Russ.) URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=11686675
- 9. Grivennaya E. N., Starostenko I. N. 2011, Mathematical model of a rating evaluation of professional activity of a teacher of a higher educational institution. Yurist-Pravoved [The scientific-theoretical and information-methodological journal "Jurist-Pravoved"], no. 5 (48), pp. 7-12. (In Russ.) URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=18877994
- 10. Kupera A. V. 2005, Stimulation of the activities of university teachers. Izvestiya Dal'nevostochnogo federal'nogo universiteta. Ekonomika i upravieniye [The bulletin of the Far Eastern Federal University. Economics and Management], no. 3, pp. 113-124. (In Russ.) URL: https://elibrary. ru/item.asp?id=11779941
- 11. Rybakova L. E. 2010, Features and consequences of motivation and stimulation of work in higher education in the context of its innovative development. Aktual'nyye problemy sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya Rossii [Topical issues of socio-economic development of Russia], no. 4, pp. 94–101. (*In Russ.*) URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=15564334
 12. Goncharenko L. P., Ponomarev M. A. 2009, Development of a rating system for students (graduates) of a university as a means of encour-
- aging cooperation between universities and commercial organizations. Ekonomicheskiy analiz: teoriya i praktika [Economic Analysis: Theory and Practice], no. 3 (132), pp. 8-14. (In Russ.) URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=11675314
- 13. Antonelly C. 2018, Knowledge exhaustibility and Schumpeterian growth. The Journal of Technology Transfer, vol. 43, issue 3, pp. 779-791. http://dx.doi.org/10.1007/s10961-017-9599-3
- 14. Coccia M. 2018, Optimization in R&D intensity and tax on corporate profits for supporting labor productivity of nations. The Journal of Technology Transfer, vol. 43, issue 3, pp. 792–814. https://doi.org/10.1007/s10961-017-9572-1





- 15. Rochev K. V. 2015, An effective material incentives system of the university staff formation results review. *Resursy yevropeyskogo severa. Tekhnologii i ekonomika osvoyeniya* [Resources of the European North. Exploration technologies and economics], no. 1, pp. 68–83. (*In Russ.*) URL: http://resteo.ru/rochev-1
- 16. Rochev K. V. 2015, Informational system of personnel stimulation at a higher educational institution. *Universitetskoye upravleniye: praktika i analiz* [Journal University Management: Practice and Analysis], no. 2 (96), pp. 74–84. (*In Russ.*) URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=24054002
- 17. Emeksuzyan A. R. 2015, Synthesis of methods to make decisions in the innovative process management. *Resursy yevropeyskogo severa. Tekhnologii i ekonomika osvoyeniya* [Resources of the European North. Exploration technologies and economics], no. 1, pp. 84–90. (*In Russ.*) URL: http://resteo.ru/emeksuzyan-1
- 18. Danilov G. V. 2013, Application of generalized characteristics of the university staff activity when forming an incentive system. *Upravleniye ekonomicheskimi sistemami* [Management of economic systems: scientific economic journal], no. 5 (53). (*In Russ.*) URL: http://uecs.ru/instrumentalnii-metody-ekonomiki/item/2159-2013-05-28-05-53-01
- 19. Maslow A. 1999, Motivatsiya i lichnost' [Motivation and personality]. Saint-Petersburg, 478 p. URL: http://psylib.org.ua/books/masla01/index.
- 20. Blume-Kohout M. E. 2016, Why are some foreign-born workers more entrepreneurial than others? *The Journal of Technology Transfer*, vol. 41, issue 6, pp. 1327–1353. https://doi.org/10.1007/s10961-015-9438-3
- 21. Schillo R. S. 2018, Research-based spin-offs as agents in the entrepreneurial ecosystem. *The Journal of Technology Transfer*, vol. 43, issue 1, pp. 222–239. https://doi.org/10.1007/s10961-016-9484-5
- 22. Chandrashekhar Iyer K., Banerjee P. S. 2018, Facilitators and inhibitors in sector wide technology transfer projects in developing economies: an empirical study. *The Journal of Technology Transfer*, vol. 43, issue 1, pp. 172–197. https://doi.org/10.1007/s10961-015-9456-1
- 23. Mendonça J., Grimpe C. 2016, Skills and regional entrepreneurship capital formation: a comparison between Germany and Portugal. *The Journal of Technology Transfer*, vol. 41, issue 6, pp. 1440–1456. https://doi.org/10.1007/s10961-015-9444-5

The article was received on July 3, 2018

УДК 332.142.2

Дифференциация арктических территорий по уровню финансовой обеспеченности

Екатерина Александровна ЗАХАРЧУК^{*}, Полина Сергеевна ТРИФОНОВА^{**}

Институт экономики УрО РАН, Россия, Екатеринбург

Актуальность. Развитие арктических территорий Российской Федерации в последние годы является одним из приоритетных направлений развития государства (освоение богатых залежей углеводородного сырья, развитие Северного морского пути, закрепление военного потенциала), а также повышения уровня жизни проживающего в Арктике населения. В то же время развитие заполярных территорий происходит крайне неравномерно, дифференциация социально-экономического развития между отдельными муниципальными образованиями приводит к существенному разрыву экономического пространства Арктики, что и предопределило актуальность настоящей работы.

Шель исследования – определить степень дифференциации уровня финансовой обеспеченности муниципальных образований Арктического региона по ключевым показателям и визуализировать расхождения в картографическом виде.

Результаты и их применение. В работе для определения объекта исследования представлен авторский подход к выделению территорий Арктического региона, основой которого является административно-территориальное деление муниципальных образований. В условиях большого массива данных предложено для визуализации использовать современные географические информационные системы (ГИС) как метод отображения экономических показателей в пространстве. В связи с этим обобщен опыт применения таких систем в различных областях знаний и основные возможности по применению в экономических исследованиях. Авторами для определения дифференциации арктических муниципальных образований определены базовые показатели, отражающие обеспеченность финансовыми ресурсами территорий. Для населения в качестве показателя выбран средний размер оплаты труда, государственный сектор представлен бюджетной обеспеченностью муниципального образования на душу населения, а индикатором активности промышленного развития определен размер инвестиции на душу населения. На основе сформированной базы данных по выделенным показателям и численности населения муниципальных образований составлены карты дифференциации арктических территорий, выделены основные особенности и специфика отдельных муниципальных образований. Представленые результаты могут быть использованы органами государственной власти и местного самоуправления при разработке стратегических документов социально-экономического развития макрорегиона как основа для планирования и прогнозирования развития отдельных арктических территорий.

Ключевые слова: арктические территории, геоинформационные технологии, инвестиции, заработная плата, бюджетная обеспеченность, муниципальные образования.

В последние годы большой интерес вызывают исследования в области изучения арктических территорий. Труды ученых посвящены вопросам транспортной инфраструктуры, благоприятности проживания, оценки полезных ископаемых, экологического развития, геополитической значимости и т. д. Круг изучаемых сфер постоянно растет и расширяется. Такой интерес к арктическим территориям вызван высокими ценами на углеводородное сырье на мировых рынках, постепенным исчерпанием запасов и снижением экономической эффективности разработки действующих многие годы месторождений. И не в последнюю очередь комплексным развитием страны и сохранением природно-климатического баланса при антропогенных нагрузках на уникальную экосистему Арктики. Однако вопросам финансового развития Арктической зоны РФ, особенностям формирования и использования финансовых ресурсов уделено, на наш взгляд, недостаточно внимания. Малоизученность финансового развития Арктики делает исследования в этой области актуальными и востребованными как при принятии управленческих решений в вопросах освоения и дальнейшего присутствия на этих территориях, так и исследования причин и условий неравенства социально-экономического развития отдельных территорий.

Методы исследования

Проблемами социально-экономического развития арктического пространства российские и зарубежные ученые занимаются достаточно давно, однако в силу узости информационной базы объектом исследования, как правило, являются крупные территории (субъекты РФ). Соответственно значительная часть исследований посвящена изучению финансовых показателей по регионам, входящим в арктические территории РФ, с использованием доступных данных статистики по валовому региональному продукту, инвестициям, доходам и расходам бюджета и т. д. [1–7]. Исследования в области изучения финансовых потоков Арктики на муниципальном уровне управления достаточно редки и фрагментарны, как правило, ограничиваются анализом либо отдельных территорий, либо финансовым анализом ограниченного круга показателей [8]. В исследованиях, основанных на методологии «Системы национальных счетов», изучается движение финансовых потоков между институциональными секторами муниципальных образований, входящих в Арктическую зону РФ [9, 10]. Полученные результаты свидетельствуют о том, что существует сильная дифференциация в социально-экономическом и финансовом развитии муниципалитетов Арктики. Однако в силу больших размерностей массив информации по всем показателям развития арктических территорий не может быть представлен в табличной форме, поскольку наличие большого количества территорий и разброс данных внутри показателей слабо воспринимается как единое целое.

В связи с этим в целях визуализации полученных результатов и в будущем создания моделей финансового развития Арктики с выделением приоритетных сфер развития экономики авторами статьи был использован инструментарий геоинформационных технологий (ГИС), который позволяет более наглядно отобразить сложившуюся картину в соци-

* ≥ zakhartchouk@mail.ru

| https://orcid.org/0000-0001-5546-8127

"pol.trifonova2018@yandex.ru

ально-экономическом развитии и привести к более глубокому пониманию процессов, протекающих на отдельных территориях. Развитие и достигнутые успехи в области цифровой картографии и географических информационных систем позволяет решать широкий спектр задач. ГИС, по своей сути, являются компьютеризированными системами для сбора, хранения, отображения и распределения географически привязанных значений показателей, создавая базы данных разной информационной направленности: физической, экономической, биологической, культурной, демографической и др. Таким образом, область применения геоинформационных технологий достаточно обширна. Она включает в себя исследование природно-общественных объектов и явлений, а также смежных с ними социально-экономических процессов, связанных с управлением территориями. Такое многообразие форм и методов дает значительные возможности применения ГИС во многих областях знаний, что отмечается в работах Дэвида М. Марка, Николаса Хрисмана и др. [11–17]. В настоящее время технология ГИС востребована для анализа экономического развития территорий на местном, региональном и государственном уровнях. При этом ГИС выступает как инструмент интерактивной визуализации и поддержки принятия решений. Такой способ анализа получил название «экономическая картография». Выбранный инструментарий имеет преимущества перед традиционными аналитическими методами и позволит более наглядно представить полученные результаты [18].

Результаты

В первую очередь, стоит отметить, что в научной литературе на сегодняшний день не сложилось единого мнения о южной границе Российской Арктики [19]. Существует несколько фундаментальных подходов к критериям отнесения территорий к арктическим, среди которых можно выделить физико-географический, биоклиматический и экономический¹.

Стоит отметить, что в нашей стране с 2014 г. Указом Президента РФ № 296 от 2 мая 2014 г. «О сухопутных территориях Арктической зоны Российской Федерации» закреплен состав сухопутных территорий Арктической зоны Российской Федерации.

Согласно документу, к сухопутным территориям Арктической зоны Российской Федерации относятся: территория Мурманской области; территория Ненецкого автономного округа; территория Чукотского автономного округа; территория Ямало-Ненецкого автономного округа; территория муниципального образования городского округа «Воркута» (Республика Коми); территории Аллаиховского улуса (района), Анабарского национального (Долгано-Эвенкийского) улуса (района), Булунского улуса (района), Нижнеколымского района, Усть-Янского улуса (района), Республика Саха (Якутия); территории городского округа города Норильска, Таймырского Долгано-Ненецкого муниципального района, Туруханского района (Красноярский край); территории муниципальных образований «Город Архангельск», «Мезенский муниципальный район», «Новая Земля», «Город Новодвинск», «Онежский муниципальный район», «Приморский муниципальный район», «Северодвинск» (Архангельская область); земли и острова, расположенные в Северном Ледовитом океане, указанные в Постановлении Президиума Центрального Исполнительного Комитета СССР от 15 апреля 1926 г. «Об объявлении территорией Союза ССР земель и островов, расположенных в Северном Ледовитом океане» и других актах СССР.

Выход документа стал значительным вкладом в развитие и упорядочение программных документов по Арктике. Однако, несмотря на свою значимость, он не был воспринят однозначно и вызвал серьезную дискуссию в научных кругах и в некоторых региональных органах власти, имеющих отношение к закрепленной зоне. В результате чего, согласно Указу Президента РФ от 27.06.2017 № 287 «О внесении изменений в Указ Президента Российской Федерации от 2 мая 2014 г. № 296 «О сухопутных территориях Арктической зоны Российской Федерации», к сухопутным территориям Арктической зоны РФ дополнительно отнесены территории муниципальных образований «Беломорский муниципальный район», «Лоухский муниципальный район» и «Кемский муниципальный район» Республики Карелия³. Разнообразие взглядов и существующих подходов по этому вопросу позволяет аргументированно включать территории в состав АЗ РФ в зависимости от стоящих перед исследователями задач. Для целей исследования финансовых потоков арктических территорий РФ были использованы, во-первых, широко поддерживаемый в научном сообществе подход В. В. Васильева, В. С. Селина, суть которого сводится к тому, что южная граница Арктики в большей степени ограничена Северным полярным кругом, т. е. географическим принципом [20]. Использование следующего критерия было обусловлено значительной площадью некоторых субъектов РФ. Существующие различия в финансово-хозяйственной деятельности в пределах одного региона достаточно велики, поэтому для объективной оценки и сопоставимости данных предлагается применять «муниципальный» подход. Он использован в Указе «О сухопутных территориях Арктической зоны Российской Федерации» при выделении арктических территорий Республики Саха, Красноярского края и Архангельской области. Используя этот же критерий, предлагается несколько изменить уже существующий состав муниципальных образований названных регионов, а в некоторых субъектах РФ, включенных полностью, часть муниципалитетов исключить. В дополнение к двум предыдущим критериям предлагается третий – зона ведения хозяйственной деятельности. В некоторых случаях хозяйственная деятельность происходит в Арктической зоне, а работой обеспечиваются жители муниципальных образований, расположенных южнее. В этом случае предлагается эти населенные пункты включать в состав Арктики [9].

С использованием совокупности ранее описанных критериев сформирована база данных муниципальных образований всех уровней, входящих в состав арктических территорий Российской Федерации (рис. 1).

Авторы предлагают рассмотреть уровень обеспеченности финансовыми ресурсами муниципальных образований Арктики через призму основных показателей, касающихся доходов домашних хозяйств, расходов государственного

¹Жуков М. А. Методологические и методические проблемы выделения Арктической зоны Российской Федерации. URL: http://www.arctic-today.ru/index.php/rajonirovanie-arktiki/19-metodologicheskie-imetodicheskie-problemy-vydeleniya-arkticheskoj-zony-rossijskoj-federatsii

²О сухопутных территориях Арктической зоны Российской Федерации: Указ Президента Российской Федерации от 02.05.2014 г. № 296. URL: http://www.szrf.ru/szrf/doc.phtml?nb=100&issid=1002014018010&docid=54 (дата обращения: 03.08.2018).

³О внесении изменений в Указ Президента Российской Федерации от 2.05.2014 г. № 296 «О сухопутных территориях Арктической зоны Российской Федерации»: Указ Президента РФ от 27.06. 2017 г. № 287. URL: http://www.kremlin.ru/acts/bank/38377



Рисунок 1. Авторское представление Арктической зоны РФ в сравнении с Указом Президента РФ. Figure 1. Author's presentation of the Arctic zone of the Russian Federation in comparison with the Decree of the President of the Russian Federation.

управления и активности предпринимательского сектора. Такой поход интегрируется с секторальным отображением финансовых потоков территорий, представленным в наших работах [9, 10], и показывает уровень развития каждого институционального сектора, представленного в Системе национальных счетов. Для сектора «Домашние хозяйства» определяющим показателем выступают доходы населения из всех источников, а основным источником доходов, как правило, является заработная плата наемных работников. Особенно это актуально именно для арктических территорий, так как другие источники доходов – пенсии, социальные пособия, доходы от предпринимательской деятельности – на данных территориях не играют ведущей роли в силу специфики образования доходов. Для сектора «Государственное управление» главную роль в сравнительной оценке благополучия территорий выступают расходы бюджета в муниципальном образовании на душу населения. Конечно, более информативным показателем выступили бы расходы консолидированного бюджета (т. е. федерального, регионального и муниципального) на конкретной территории, однако в современной статистической базе такой информации не предоставляется, поэтому для сравнения бюджетной обеспеченности арктических территорий можно использовать показатель «Бюджетообеспеченность муниципальных образований по расходам», тем более что в этих расходах учтена часть расходных обязательств вышестоящих бюджетов.

В качестве индикатора развития корпоративного сектора используется показатель «Инвестиции в основной капитал из всех источников», отображаемый в статистических базах Росстата. К тому же данный показатель позволяет определить в первую очередь экономический интерес к развитию этих территорий как со стороны власти, так и бизнеса. Он показывает, насколько муниципалитеты инвестиционно привлекательны и в будущем смогут создавать валовый муниципальный продукт.

В целях определения дифференциации арктических территорий авторами была сформирована база данных по исследуемым показателям развития территорий за 2008–2016 гг., источником послужила Единая база муниципальных образований Росстата⁴. Предварительный анализ массивов данных по показателям позволил определить, что сильный разброс значений по арктическим территориям не позволяет применить универсальную методику их отображения в одной шкале, поэтому к каждому показателю применяется собственная методика по визуализации дифференциации. Для отображения различий в уровне финансового обеспечения муниципалитетов Арктики выбран последний год в анализируемом периоде – 2016-й. В первую очередь, была применена наиболее распространенная шкала отображения дифференциации данных – относительно среднего значения для показателя инвестиций в основной капитал. В качестве среднего было использовано российское значение показателя, составляющее в 2016 г. 1469,8 тыс. руб. на душу населения. На рис. 2 представлена карта, на которой отображена инвестиционная активность предприятий арктических территорий, по сравнению со среднероссийским значением. Из рис. 2 наглядно видно, что ниже, чем по России, инвестиции наблюдаются в части Мурманской области и в восточной части страны, кроме Чукотского АО. Срединная часть территории Арктики – от Архангельской области и в восточной части страны, кроме Чукотского АО. Срединная часть территории Арктики – от Архангельской области и обрасноврского края – имеет высокий инвестиционный потенциал, обеспечивая хорошие показатели на душу населения.

⁴База данных показателей муниципальных образований Росстата РФ. URL: http://www.gks.ru/free_doc/new_site/bd_munst/munst.htm (дата обращения: 03.08.2018).



Рисунок 2. Дифференциация инвестиций в основной капитал муниципальных образований Арктической зоны РФ. Figure 2. The differentiation of investments in the fixed capital of municipalities of the Arctic zone of the Russian Federation.

Стоит также отметить, что данный подход к отображению данных не позволяет увидеть существующий разброс в инвестициях, например, исходя из официальных данных, в ряде муниципальных образований Чукотского АО (Чаунский и Иультинский районы) инвестиции в основной капитал вообще не регистрируются, и, наоборот, в Пуровском районе ЯНАО данный показатель составляет более 129 млн руб. на душу населения, превышая среднероссийский в 88 раз. Также официальная статистика не всегда корректно отображает реальные процессы по накоплению основного капитала на территориях: Ямальский муниципальный район ЯНАО по инвестициям не дотягивает до среднероссийского уровня, причем на территории полуострова Ямал реализуется несколько масштабных проектов – разработка Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения и проект «Ямал СПГ». В целом картографическое отображение инвестиций на душу населения показывает достаточно ясную картину инвестиционной активности арктических территорий: наиболее инвестиционно привлекательными являются муниципальные образования, тяготеющие к Северному морскому пути и на территории которых расположены месторождения со значительными запасами природных ресурсов.

Следующим показателем, характеризующим финансовое развитие арктических территорий, выступает средняя заработная плата наемных работников по исследуемым муниципальным образованиям.

Предварительный анализ уровня зарплат на арктических территориях показал, что лишь два муниципальных образования (Ловозерский район Мурманской области и Эвено-Бытантайский национальный улус Республики Саха) по уровню оплаты находятся на среднероссийском уровне (в 2016 г. - 36 709 руб.), что делает бессмысленным привязку к данному значению. Ранжирование арктических муниципальных образований показало, что средняя заработная плата на данных территориях колеблется от 37 260 руб. до 104 089 руб. в Надымском муниципальном районе ЯНАО. В соответствии с этим более логично для отображения уровня заработных плат провести градацию полученных значений в определенном диапазоне. Для этих целей были выделены четыре диапазона среднемесячной заработной платы по муниципальным образованиям: до 40 тыс. руб.; 40-60 тыс. руб.; 60-80 тыс. руб.; свыше 80 тыс. руб., результаты представлены на рис. 3. Как видно из картографического материала, заработная плата наемных работников примерно у половины арктических муниципальных образований укладывается в диапазон 40-60 тыс. руб. Несмотря на то что это существенно больше, чем среднероссийское значение, учитывая специфику территорий (отдаленность от «большой земли», высокий прожиточный уровень, суровые климатические условия проживания), данные уровень заработной платы не является слишком высоким для населения. У значимой части территорий уровень доходов варьируется в диапазоне 60-80 тыс. руб. в месяц, что в два с лишним раза превышает среднероссийский заработок населения, и географически, как видно из карты, это подавляющая часть территорий российской Арктики. Самая высокооплачиваемая рабочая сила расположена неравномерно – такие анклавы есть практически у всех регионов Арктики, кроме Мурманской области.

Стоит отметить, что, судя по всему, показатель средней заработной платы является в статистике более корректно отображаемым показателем, чем инвестиции в основной капитал. Для районов, ориентированных на добычу сырья или с высокой инвестиционной активностью, статистика по оплате труда показывает повышенные доходы населения, а занятых в малорентабельных отраслях (добыча угля, машиностроение и услуги) – средние значения по территориям Арктического региона. Использование ранжированных значений при отображении заработной платы работников Арктического макрорегиона позволило более наглядно представить масштаб дифференциации доходов отдельных муниципальных образований, так как на соседних территориях (например, в Республике Саха или Чукотском автономном округе) возможны разрывы в оплате труда, достигающие 150–200 %. В целом закономерность в уровне оплаты труда во многом зависит от специализации муниципальных образований – добыча нефти и газа обеспечивает значительное преимущество в доходах населения.



Рисунок 3. Дифференциация заработной платы наемных работников муниципальных образований Арктической зоны РФ. Figure 3. The differentiation of remuneration of labor of municipalities' workers of the Arctic zone of the Russian Federation.

И последний из отобранных целевых показателей, «Бюджетообеспеченность муниципальных образований по расходам», рассчитан как отношение общего объема расходов муниципального бюджета к среднегодовой численности постоянного населения этих территорий, т. е. показывает, сколько бюджетных денег приходится на одного жителя. Если рассматривать данный показатель в динамике по арктическим территориям, то характерной особенностью выступает разнонаправленность динамики бюджетообеспеченности муниципальных образований. В таблице представлены расчеты авторов по бюджетной обеспеченности некоторых территорий Арктики за 2008–2016 гг., ограниченность выборки обусловлена уже упоминавшимся масштабом и размерностью представления табличных данных. Как видно из таблицы, по сравнению с 2008 г. в 2016 г. даже в реальном выражении (без учета инфляции) у некоторых муниципальных образований ЯНАО произошло снижение бюджетных расходов на одного жителя. Причем в эту категорию попали достаточно благополучные территории – Надымский, Приуральский муниципальные районы, а также г. Новый Уренгой, занимающие лидирующие позиции по другим исследуемым параметрам развития. Другая крайность – резкий рост бюджетной обеспеченности территорий Республики Саха; если в среднем по представленной выборке бюджетообеспеченность с 2008 по 2016 г. выросла на 76 %, то у всех без исключения муниципальных образований Якутии динамика была лучше, колеблясь от 84,5 до 189,5 %. Поэтому во многих арктических районах Якутии бюджетная обеспеченность превысила аналогичные показатели Ямала (исключение – Ямальский и Пуровский муниципальные районы), что можно объяснить политикой федеральных и региональных органов власти по выравниванию расходов бюджета среди муниципальных образований.

Спецификой данных по показателю является огромный разрыв между арктическими территориями: если по заработной плате разброс значений составлял почти 3 раза, то по бюджетообеспеченности колебания составляют от 14,87 тыс. руб. на душу населения (Ловозерский район Мурманской области) до 388,5 тыс. руб. (Ямальский район ЯНАО), или более чем в 26 раз. Аналитические методы исследования показали, что наиболее удобной градацией для отображения бюджетной обеспеченности арктических муниципальных образований является группировка данных в диапазонах: до 100 тыс. руб. на жителя, 100–200тыс. руб., 200–300 и свыше 300 тыс. руб. (рис. 4). В первую, наименее обеспеченную группу, вошли 17 муниципальных образований – это практически все территории Мурманской области (за исключением Терского района и г. Островной), муниципальные образования Республики Коми, Архангельской области и Ненецкого АО, а также (что удивительно) Новоуренгойский район ЯНАО. Во вторую группу включены 13 муниципальных образований – в этой группе значительная часть территорий Республики Саха, часть районов ЯНАО и два муниципальных образования Мурманской области. Как видно из карты, наибольшую территорию занимают муниципальные образования с расходами от 200 до 300 тыс. руб., количественно их меньше, чем в предыдущих группах, – всего 10. Большая часть из них расположена в ЯНАО, в других регионах данная группа представлена несколькими районами. Самые богатые по бюджетообеспеченности территории – а их всего шесть – преимущественно расположены на Ямале, один находится в Красноярском крае (Эвенкийский район), два – на Чукотке.

Конечно, показатель бюджетообеспеченности территорий не дает полного представления о расходах, производимых в муниципальных образованиях консолидированным бюджетом РФ, так как не учитывает расходы, проведенные помимо муниципального бюджета, в то же время данный показатель дает представление о дифференциации самостоятельности местного самоуправления в развитии своих поселений, учитывая финансовые возможности местного бюджета.

Выводы

Проведенное исследование по определению дифференциации по уровню финансовой обеспеченности арктических территорий и применению ГИС-технологий для ее отображения позволило сделать ряд основополагающих выводов.

Использование геоинформационных технологий для отображения больших массивов данных позволяет упростить представление информации о развитии тех или иных явлений и процессов. В условиях, когда осуществляется привязка

Бюджетообеспеченность по расходам арктических муниципальных образований Республики Коми, Ямало-Ненецкого автономного округа, Республики Саха (Якутия) за 2008–2016 гг., тыс. руб./чел.

Fiscal capacity for expenditures of the Arctic municipalities of the Republic of Komi, the Yamalo-Nenets Autonomous District, the Republic of Sakha (Yakutia) for 2008-2016, thousand rubles per person.

Муниципальное образование	Годы									Темп
	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	прироста, %
				Республ	ика Коми					
ГО Воркута	29,04	28,17	30,72	33,76	47,15	43,59	43,56	42,53	43,59	50,10
ГО Усинск	31,93	29,58	34,12	43,45	53,77	56,88	63,69	61,06	63,89	100,12
			Ямало-	-Ненецкий	автономн	ый округ				
Надымский МР	120,06	84,54	104,20	130,09	113,89	130,79	135,21	102,37	101,36	-15,58
Приуральский МР	245,13	203,70	226,23	282,83	245,89	249,22	248,84	209,86	213,05	-13,09
Пуровский МР	149,42	113,01	158,19	194,57	175,45	187,01	195,46	157,97	314,03	110,17
Тазовский МР	229,53	249,48	280,16	365,61	305,74	358,35	399,70	346,09	382,64	66,71
Ямальский МР	221,73	288,55	287,63	396,09	358,41	379,48	367,15	291,49	388,49	75,21
ГО Салехард	114,87	100,43	125,95	127,77	130,55	135,45	137,40	109,33	117,75	2,51
ГО Лабытнанги	131,31	147,67	124,67	157,20	183,34	176,06	167,59	183,30	133,39	1,59
ГО Новый Уренгой	92,87	97,20	89,12	102,04	85,55	88,98	91,08	82,16	91,29	-1,70
			Pe	еспублика (Саха (Якуп	пия)				
Абыйский МР	97,42	118,30	81,99	103,63	123,45	162,84	178,83	183,82	195,43	100,61
Аллаиховский МР	101,14	126,15	89,16	108,96	126,01	176,56	191,45	192,57	193,64	91,45
Анабарский нацио-										
нальный (долгано-		0.4.00				4=0.00		001-0	- · · · - ·	400 = 4
эвенкийский) МР	75,56	91,92	85,90	89,42	118,72	150,00	167,55	201,79	218,74	189,51
Булунский МР	61,90	63,50	54,05	62,03	79,79	101,90	110,46	124,05	119,56	93,15
Верхнеколымский МР	77,98	106,72	96,01	86,91	91,61	121,12	175,28	145,86	175,21	124,70
Верхоянский МР	89,63	103,75	77,67	153,96	137,23	144,84	171,26	169,01	214,90	139,76
Жиганский МР	78,40	85,00	62,46	100,60	98,44	121,55	152,59	186,35	185,97	137,21
Момский МР	106,10	128,07	98,06	119,17	133,30	182,04	216,33	217,19	275,99	160,13
Нижнеколымский МР	85,71	106,63	87,60	85,27	119,51	150,34	160,14	152,45	166,94	94,77
Оленёкский МР	93,62	111,77	84,00	102,04	119,95	197,47	233,08	219,08	255,47	172,89
Среднеколымский МР	87,91	106,39	91,92	111,91	103,98	147,66	145,47	154,81	162,45	84,80
Усть-Янский МР	96,04	123,84	103,17	123,03	113,67	143,68	169,07	170,61	203,30	111,69
Эвено-Бытантайский национальный МР	80,53	99,10	86,49	97,12	83,83	141,99	168,36	181,32	197,73	145,54

ГО – городской округ; МР – муниципальный район.



Рисунок 4. Дифференциация бюджетообеспеченности муниципальных образований Арктической зоны РФ. Figure 4. The differentiation of fiscal capacity of municipalities of the Arctic zone of the Russian Federation.

к небольшим территориальным образованиям (в нашем случае – муниципалитетам), использование ГИС-технологий значительно повышает восприятие информации, дает возможность емко и наглядно отразить полученный результат, тем самым приобретая преимущества перед табличной формой представления. Как показало данное исследование,

дифференциация показателей развития территорий может основываться на различных подходах: относительно среднего по стране, по региону, сформированной шкале данных в зависимости от среднего значения, группировки данных по массиву.

Дифференциация между показателями социально-экономического развития арктических территорий достигает десятков раз, наименьший разрыв наблюдается в средних заработных платах наемных работников, наибольший – в инвестициях на душу населения. При этом даже внутри одного региона разрывы в финансовом обеспечении могут отличаться на порядок, определяя различные возможности для развития муниципальных образований.

Использование привязки к муниципальному уровню управления позволяет более объективно показывать уровень их дифференциации как в рамках всего Арктического региона, так и внутри субъектов Федерации, что является важным при разработке прогнозов и планировании направлений социально-экономического развития Арктической зоны РФ. Выбор показателей, характеризующих различные сферы развития территорий, позволяет комплексно оценить реальное положение муниципальных образований и определить основные источники их финансового потенциала.

В целом лидерами по показателям социально-экономического развития в российской Арктике являются территории, основной экономической базой которых является добыча углеводородного сырья: это практически все территории ЯНАО и НАО, Красноярского края. Муниципальные образования Мурманской области и Республики Саха показывают смешанный характер развития по исследованным показателям, однако в целом значительно отстают от сырьевых территорий. Особая ситуация сложилась в муниципальных образованиях Чукотского АО: при полном отсутствии инвестиций заработная плата и бюджетная обеспеченность находятся на высоком уровне, что говорит о зависимости территорий от вышестоящих бюджетов.

В заключение отметим, что представленная работа является промежуточным этапом комплексного изучения условий и факторов социально-экономического развития арктических муниципальных образований, направленным на создание системы прогнозирования движения финансовых потоков этих территорий, необходимых при разработке стратегических документов развития макрорегиона органами государственной власти и местного самоуправления.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, проект № 18-010-01007 А «Финансовые потоки Арктики: формирование, распределение и использование добавленной стоимости в условиях промышленного освоения новых пространств».

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Пешина Э. В., Захаров А. С. Пространственная интеграция бюджетных ресурсов в арктической зоне России // Региональная экономика: теория и практика. 2017. Vol. 15, issue 5. P. 814-831. https://doi.org/10.24891/re.15.5.814
- 2. Кобылинская Г. В. Воздействие финансовой структуры инвестиционных процессов на развитие регионов севера и Арктики // Север и Арктика в новой парадигме мирового развития. Лузинские чтения. 2016. С. 585-589.
- 3. Никулкина И. В. Стратегический подход к формированию и реализации государственной финансовой политики в арктической зоне Российской Федерации: методологический аспект // Экономика и предпринимательство. 2016. № 9 (74). С. 205–210.
- 4. Бабурина Н. А., Дмитриева А. А. Банковское финансирование инновационного развития циркумполярных регионов России: особенности и вызовы // Мир экономики и управления. 2017. Т. 17, № 1. С. 100–113.
- 5. Власова В. В. Стратегия организации финансирования приоритетов развития территории (на примере Арктической зоны Российской Федерации) // Управленческое консультирование. 2016. № 6 (90). С. 73-80.
- 6. Стратегия хозяйственного освоения малоизученных территорий Уральского Севера / под общ. ред. акад. РАН А. И. Татаркина. Екатеринбург. 2011. 520 с.
- 7. Пасынков А. Ф. Разработка сценариев устойчивого социально-экономического развития монопрофильного города сырьевого типа. Екатеринбург: Ин-т экономики УрО РАН, 2006. 54 с.
- 8. Разработка стратегии освоения и системного развития северных, полярных и арктических территорий / под общ. ред. акад. РАН А. И. Татаркина. Екатеринбург: Ин-т экономики УрО РАН; СПб.: Нестор-История, 2014. 510 с.
- 9. Татаркин А. И., Захарчук Е. А., Пасынков А. Ф. Арктические территории России: формирование статистических районов и обоснование возможностей финансового развития / отв. ред. А. И. Татаркин. Екатеринбург, 2015. 186 с.
- 10. Захарчук Е. А., Пасынков А. Ф. Российская Арктика: оценка и возможности финансового развития // ЭКО. 2016. № 5 (503). С. 107–119. http://dx.doi.org/10.30680/ECO0131-7652-2016-5-107-119
- 11. Vergara M. N., Bondesan A., Ferrarese F. GIS analysis of the trafficability determined by slope in the eastern Tyrol front (WWI, Eastern Alps): a military history reading // Cartography and Geographic Information Science. 2018. Vol. 45, issue 6. P. 477-494. https://doi.org/10.1080/15230
- 406.2017.1399828 12. Anderson A. L., Rocek T. R. GIS modeling of agricultural suitability in the highlands of the Jornada branch of the Mogollon culture of south central New Mexico // Journal of Archaeological Science: Reports. 2018, December. Vol. 22. P. 142–153. https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2018.09.009 13. Ghorbanzadeh O., Feizizadeh B., Blaschke T. Multi-criteria risk evaluation by integrating an analytical network process approach into GIS-
- based sensitivity and uncertainty analyses // Geomatics, Natural Hazards and Risk. 2018. Vol. 9, issue 1. P. 127-151. https://doi.org/10.1080/19 475705.2017.1413012 14. Özceylan E., Çetinkaya C., Erbaş M., Kabak M. Logistic performance evaluation of provinces in Turkey: A GIS-based multi-criteria decision analysis // Transportation Research. Part A: Policy and Practice. 2016, December. Vol. 94. P. 323–337. https://doi.org/10.1016/j.tra.2016.09.020
- 15. Gigović L., Pamučar D., Lukić D., Marković S. GIS-Fuzzy DEMATEL MCDA model for the evaluation of the sites for ecotourism development: A case study of "Dunavskiključ" region, Serbia // Land Use Policy. 2016. Vol. 58. P. 348-365. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2016.07.030 16. Popova O., Glebova J., Pustovgar A. Quality assessment of urban areas based on neural network modeling and GIS // E3S Web of Conferences. Vol. 33, 6 March 2018. 02032. https://doi.org/10.1051/e3sconf/20183302032
- 17. Maklakov K. V., Malygina N. V. Comparative Analysis of External Factors Affecting the Population of Wild Reindeer in Taimyr // Contemporary Problems of Ecology. 2016. Vol. 9, issue 1. P. 68–77. https://doi.org/10.1134/S1995425516010091

 18. Drummond W. J. GIS as a visualization tool for economic development // Computers, environment and urban systems. 2013. T. 17, №. 6. P.
- 469-479. https://doi.org/10.1016/0198-9715(93)90046-8
- 19. Российская Арктика: современная парадигма развития / под ред. акад. А. И. Татаркина. СПб.: Нестор-История, 2014. 808 с.
- 20. Васильев В. В., Селин В. С. Метод комплексного природохозяйственного районирования и выделение южной границы российской Арктики // Вестник Кольского научного центра РАН. 2014. № 1(16). С. 64-71.

Статья поступила в редакцию 27 августа 2018 г.

УДК 332.142.2

Differentiation of the Arctic territories by the level of financial security

Ekaterina Aleksandrovna ZAKHARCHUK', Polina Sergeevna TRIFONOVA"

Institute of Economics of the Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russia

Relevance. The development of the Arctic territories of the Russian Federation in recent years is one of the priority directions of development of the government (development of rich hydrocarbon deposits, development of the Northern Sea Route, strengthening of military potential), as well as raising the standard of living of the population living in the Arctic. At the same time, the development of the polar areas is extremely uneven, the differentiation of socio-economic development between individual municipalities leads to a significant rupture of the economic space of the Arctic, which predetermined the relevance of this work.

Purpose of the study is to determine the degree of differentiation of the level of financial security of municipalities in the Arctic region by key indicators and visualize some discrepancies as a cartograph.

Results and their application. The work presents the author's approach to identifying the territories of the Arctic region, the basis of which is the administrative-territorial division of municipalities. In the conditions of a large data array, it was proposed to use modern geographic information systems (GIS) for visualization as a method for mapping economic indicators in space. In this regard, the experience of using such systems in various fields of knowledge and the main possibilities of application in economic research are summarized. To determine the differentiation of the Arctic municipalities, the authors have specified the basic indicators reflecting the financial security of the territories. For the population, the average size of remuneration of labor is chosen as an indicator, the public sector is represented by the budgetary security of the municipality per capita, and the indicator of the activity of industrial development is determined by the amount of investment per capita. On the basis of the formed database according to the selected indicators and population size of municipalities, maps of differentiation of the Arctic territories were compiled, the main peculiarities and specific features of individual municipalities were identified. The presented results can be used by public authorities and local governments in the development of strategic documents for the socio-economic development of the macroregion as a basis for planning and forecasting the development of individual Arctic territories.

Keywords: arctic territories, geo-information technologies, investments, remuneration of labor, fiscal capacity, municipalities.

Acknowledgements

The study was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research, project No. 18-010-01007 A called "Financial flows of the Arctic: formation, distribution and use of value added in the conditions of industrial development of new areas".

REFERENCES

- 1. Peshina E. V., Zakharov A. S. 2017, Spatial integration of budgetary resources in the arctic zone of Russia. *Regional'naya ekonomika: teoriya i praktika* [Economic Analysis: Theory and Practice], vol. 15, issue 5, pp. 814–831. https://doi.org/10.24891/re.15.5.814
 2. Kobylinskaya G. V. 2016, *Vozdeystviye finansovoy struktury investitsionnykh protsessov na razvitiye regionov severa i Arktiki* [The impact of the
- 2. Kobylinskaya G. V. 2016, *Vozdeystviye finansovoy struktury investitsionnykh protsessov na razvitiye regionov severa i Arktiki* [The impact of the financial structure of investment processes on the development of the north regions and the Arctic]. The North and the Arctic in the new paradigm of world development. *Luzinskie chteniya* [Luzinsky Readings], pp. 585–589.
- 3. Nikulkina I. V. 2016, Strategic approach to the formation and implementation of state financial policy in the Arctic zone of the Russian Federation: methodologic aspect. *Ekonomika i predprinimatel'stvo* [Journal of Economy and entrepreneurship], no. 9 (74), pp. 205–210. (*In Russ.*)
- 4. Baburina N. A., Dmitrieva A. A. 2017, Bank financing of innovative development of the circumpolar regions of Russia: features and challenges. *Mir ekonomiki i upravleniya* [World of economics and management], vol. 17, no. 1, pp. 100–113.
- 5. Vlasova V. V. 2016, The strategy of organizing the financing of development priorities of the territory (using the Arctic zone of the Russian Federation as an example). *Upravlencheskoe konsul'tirovanie* [Administrative Consulting], no. 6 (90), pp. 73–80. (*In Russ.*)
- 6. 2011, Strategiya khozyaystvennogo osvoyeniya maloizuchennykh territoriy Ural'skogo Severa [The strategy of economic development of the underexplored territories of the Ural North]. Ed. by A. I. Tatarkin. Ekaterinburg, 520 p.
- 7. Pasynkov A. F. 2006, Razrabotka stsenariyev ustoychivogo sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya monoprofil'nogo goroda syr'yevogo tipa [Development of scenarios for sustainable socio-economic development of a monotown of the primary type]. Ekaterinburg, 54 p.
- 8. 2014, Razrabotka strategii osvoyeniya i sistemnogo razvitiya severnykh, polyarnykh i arkticheskikh territoriy [Development of reclamation and system development of Northern, polar and Arctic territories]. Ed. by A. I. Tatarkin, Ekaterinburg, 510 p.
- 9. Tatarkin A. İ., Zakharchuk E. A., Pasynkov A. F. 2015, *Arkticheskiye territorii Rossii: formirovaniye statisticheskikh rayonov i obosnovaniye vozmozhnostey finansovogo razvitiya* [Arctic territories of Russia: formation of statistical areas and justification of financial development opportunities]. Ed. by A. I. Tatarkin. Ekaterinburg, 186 p.
- 10. Zakharchuk E. A., Pasynkov A. F. 2016, Rossiyskaya Arktika: otsenka i vozmozhnosti finansovogo razvitiya [Russian Arctic: assessment and opportunities for financial development]. EKO [ECO], No 5 (503), pp. 107–119. http://dx.doi.org/10.30680/ECO0131-7652-2016-5-107-119
- 11. Vergara M. N., Bondesan A., Ferrarese F. 2018, GIS analysis of the trafficability determined by slope in the eastern Tyrol front (WWI, Eastern Alps): a military history reading. *Cartography and Geographic Information Science*, vol. 45, issue 6, pp. 477–494. https://doi.org/10.1080/152304 06.2017.1399828
- 12. Anderson A. L., Rocek T. R. 2018, GIS modeling of agricultural suitability in the highlands of the Jornada branch of the Mogollon culture of south central New Mexico. *Journal of Archaeological Science: Reports*, vol. 22, pp. 142–153. https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2018.09.009
- 13. Ghorbanzadeh O., Feizizadeh B., Blaschke T. 2018, Multi-criteria risk evaluation by integrating an analytical network process approach into GIS-based sensitivity and uncertainty analyses. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, vol. 9, issue 1, pp. 127–151. https://doi.org/10.1080/19475705.2017.1413012
- 14. Özceylan E., Çetinkaya C., Erbaş M., Kabak M. 2016, Logistic performance evaluation of provinces in Turkey: A GIS-based multi-criteria decision analysis. *Transportation Research. Part A: Policy and Practice*, vol. 94, pp. 323–337. https://doi.org/10.1016/j.tra.2016.09.020
- 15. Gigović L., Pamučar D., Lukić D., Marković S. 2016, GIŚ-Fuzzy DEMATEL MCDA model for the evaluation of the sites for ecotourism development: A case study of "Dunavskiključ" region, Serbia. *Land Use Policy*, vol. 58, December,pp. 348–365. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2016.07.030



E. A. Zakharchuk, P. S. Trifonova / News of the Ural State Mining University. 2018. Issue 4(52), pp. 143-151 ECONOMIC SCIENCES

- 16. Popova O., Glebova J., Pustovgar A. 2018, Quality assessment of urban areas based on neural network modeling and GIS. E3S Web of Conferences, vol. 33, 02032. https://doi.org/10.1051/e3sconf/20183302032
- 17. Maklakov K. V., Malygina N. V. 2016, Comparative Analysis of External Factors Affecting the Population of Wild Reindeer in Taimyr. Contemporary Problems of Ecology, vol. 9, issue 1, pp. 68–77. https://doi.org/10.1134/S1995425516010091
- 18. Drummond W. J. 2013, GIS as a visualization tool for economic development. *Computers, environment and urban systems*, vol. 17, no. 6, pp. 469–479. https://doi.org/10.1016/0198-9715(93)90046-8
- 19. 2014, Rossiyskaya Arktika: sovremennaya paradigma razvitiya [Russian Arctic: modern development paradigm]. Ed. by A. I. Tatarkin, Saint Petersburg, 808 p.
- 20. Vasiliev V. V., Selin V. S. 2014, The method of complex natural management zoning and the selection of the southern border of the Russian Arctic. *Vestnik Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN* [Bulletin of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], no. 1 (16), pp. 64–71. (*In Russ.*)

The article was received on August 27, 2018

История горного дела

Анатолий Филиппович Бушмакин (1947–1999) и бушмакинит

Дмитрий Алексеевич КЛЕЙМЕНОВ*, Валерий Иванович КАЙНОВ**
*dmitry_kleimenov@mail.ru
*ugm1937@mail.ru

Уральский геологический музей Уральского государственного горного университета Dmitriy Alekseevich KLEIMENOV', Valery Ivanovich KAINOV''
'dmitry_kleimenov@mail.ru
"ugm1937@mail.ru

Ural Geological Museum – Ural State Mining University

Anatoly Filippovich Bushmakin (1947–1999) and Bushmakinite

Anatoly Filippovich Bushmakin (1947–1999) is a well-known Ural mineralogist, one of the founders of the Ural school of mineralogy of technogenesis, and one of the discoverers of 10 new minerals.

Keywords: Bushmakin, bushmakinite, mineralogy, technogenesis, the Urals.

Анатолий Филиппович Бушмакин (1947–1999) – известный уральский минералог, один из основателей уральской школы минералогии техногенеза, соавтор открытия 10 новых минералов.

Ключевые слова: Бушмакин, бушмакинит, минералогия, техногенез, Урал.

сновные даты жизни и деятельности А. Ф. Бушмакина (по [1]):

1947 – родился 29 сентября в г. Свердловске (ныне – Екатеринбург) в семье рабочего.

1955–1966 – учеба в школе № 2 г. Свердловска (ныне – Екатеринбург).

1966–1968 – служба в рядах Советской Армии, в технической части ВВС.

1969 — принят в научно-производственный отдел Свердловского горного института (ныне – УГГУ) на должность лаборанта, где последовательно работал старшим лаборантом, инженером, младшим научным сотрудником

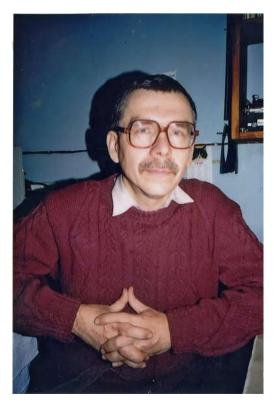
1970–1978 – учеба на заочном факультете Свердловского горного института по специальности «Геология и разведка месторождений полезных ископаемых».

1980–1983 – учеба в очной аспирантуре в Свердловского горном институте.

1983–1989 – работа в должности младшего научного сотрудника в научно-исследовательском секторе Свердловского горного института.

1989 – в связи с избранием по конкурсу переведен на должность научного сотрудника лаборатории минералогии техногенеза в Институт минералогии УрО РАН (г. Миасс).

1990 – защита в диссертационном совете Института геологии и геохимии УрО РАН кандидатской диссертации на тему «Пирит черносланцевой толщи Куларского района (Северная Якутия)».



Анатолий Филиппович Бушмакин

^{&#}x27;Продолжение серии статей проекта «Минералогия в лицах». См.: А. В. Шубников (1887–1970) и шубниковит (Изв. УГГУ, № 1(49), 2018. С. 140–146); В. П. Шуйский (1935–2000) и шуйскит (Изв. УГГУ, № 2(50), 2018. С. 157–161); Ю. С. Кобяшев (1935–2009) и кобяшевит (Изв. УГГУ, № 3(51), 2018. С. 165–175).

- 1991 переведен на должность старшего научного сотрудника.
- 1994 присвоено ученое звание «старший научный сотрудник».
- 1998 исполняющий обязанности заведующего лабораторией техногенеза.
- **1999** в связи с реорганизацией структуры Института минералогии УрО РАН переведен на должность старшего научного сотрудника лаборатории минералогии, техногенеза и геоэкологии.
 - 1999 27 декабря трагическая гибель Анатолия Филипповича Бушмакина.

В научной деятельности Анатолия Филипповича Бушмакина можно выделить два периода.

Работа в научно-исследовательском секторе на кафедре минералогии, петрографии и геохимии Свердловского горного института (ныне – УГГУ), в ходе которой А. Ф. Бушмакин был исполнителем хоздоговорных тем. Здесь закладываются основы его дальнейшего плодотворного научного сотрудничества с Борисом Валентиновичем Чесноковым (1928—2005).

В этот период выходят первые статьи Анатолия Филипповича, посвященные вопросам минералогии Березовского золоторудного месторождения, детальному изучению минералов висмута и никеля, причин возникновения октаэдрической отдельности у галенита. Меняется тематика научно-исследовательских работ кафедры, и сотрудники выезжают на золоторудные месторождения в Северной Якутии. Задачи работ: выявить закономерности в распределении золотого оруденения, изучить минералы-спутники драгоценного металла, понять особенности происхождения и преобразования вмещающих оруденения черносланцевых пород. Изменяется и тематика научных публикаций ученого. Со свойственной ему скрупулезностью, вдумчивостью он анализирует состав пирита, с которым связано оруденение, проводит исследование изотопного состава серы, изморфной примеси мышьяка, изучает его термоэлектрические свойства.

Работая над изучением различного минерального вещества, Анатолий Филиппович усовершенствовал имеющиеся и разработал новые приемы работы: магнитный указатель для выявления даже очень слабомагнитных минералов, иглу для отбора монофракций (стальная игла разогревалась и впаивалась тупым концом в пластмассовую палочку), технологию подготовки рентгенограмм, метод выявления электропроводящих минералов с помощью декорирования металла и др. [1].

После перехода Анатолия Филипповича Бушмакина в Институт минералогии УрО РАН в г. Миассе начинается второй этап его научной деятельности. Совместно с Б. В. Чесноковым они начинают изучение минерализации металлических предметов в экстремальных условиях техногенной среды — в горящих угольных отвалах Коркинского месторождения. Так был заложен фундамент уральской школы минералогии техногенеза. В результате многолетних исследований был открыт целый комплекс уникальных минералов, многие из которых еще не были известны науке. Но Международная минералогическая ассоциация, первоначально утвердив первые из них в качестве новых минеральных видов, впоследствии отказалась регистрировать следующие, мотивировав свое решение тем, что эти соединения имеют техногенную природу образования. Но жизнь все расставляет по своим местам, и уже в XXI в. российские



Бушмакинит (желтые уплощенные кристаллы), моттрамит (черный), пироморфит (зеленый), церуссит на кварце и галените. Березовское золоторудное месторождение. Шахта Северная. Типовой образец бушмакинита. Размер поля зрения 15 × 25 мм.

Воспоминания об А. Ф. Бушмакине его коллег и учеников

В глазах 19-летней выпускницы горно-металлургического техникума, пришедшей по распределению на кафедру минералоги и петрографии, Анатолий Филиппович Бушмакин был идеалом. Он приходил на работу к 8 утра, хотя рабочий день начинался в 8-30.

Поразила исключительная пунктуальность, порядок в записях, бумагах, разложенных образцах, аккуратно рассортированных пакетах с пробами. Ни разу за 10 лет совместной работы и общения Анатолий Филиппович не вышел из себя, не нагрубил, это был всегда очень спокойный и уравновешенный человек.

Однажды я притащила брошенного, грязного, рыжего котенка. Упросила оставить на субботу и воскресенье в рентгеновской лаборатории.

Прихожу в понедельник – кота нет. Оказывается, котик играл пакетиками с пробами. «Геологический котик», – сказал Анатолий Филиппович и взялего к себе домой.

В один из полевых сезонов по научно-исследовательской теме (по кварцу) работали вместе с Анатолием Филипповичем под г. Магнитогорском, поселок «Южный». Жили в общежитии, а «науку творили» на кернохранилище. От столбика керна через интервал нужно было отбить кусочек на полировку (аншлиф), другой кусочек – на анализ. Мои обязанности были нехитрые, по-МОЧЬ НОСИЛКИ С ЯЩИКОМ ПРИволочь, да подписать этикетку и упаковать пробу в пакет из крафт-бумаги. Зато Анатолий Филиппович добросовестно успевал не только результаты в пикетажку занести, но и абрис сделать, и пару фраз написать. К концу сезона отчет был готов. А после работы мы каждый день по традиционному маршруту заходили в местный магазин - сельпо. Поселок «Южный» имел особое, специальное снабжение (пьезокварц, добываемый на месторождении, ОТНОСИЛСЯ к стратегическому сырью), и полочки сельского магазина были уставлены парфюмерией высшего класса из Франции и Италии. И наша с ним задача состояла в том, чтобы каждый день понюхать два, каждый раз новых, типа духов, услышать их аромат, прочувствовать все аккорды запаха. В конце командировки Анатолий Филиппович, основываясь на результатах нашей «экспертизы», выбрал духи своей супруге. Вот такой обстоятельный человек он был даже в житейских вопросах. Светлая ему память.

Виктория Геннадьевна Неволина, главный хранитель Уральского геологического музея УГГУ

ученые открывают полностью идентичные минеральные фазы в продуктах возгона вулканов на Камчатке, сохраняя для них названия, присвоенные уральскими первооткрывателями – Борисом Валентиновичем Чесноковым и Анатолием Филипповичем Бушмакиным.

Ученый продолжал активное минералогическое изучение и классических уральских месторождений: Березовского золоторудного, Меднорудянского, Сарановского, Воронцовского. В материале из Воронцовского месторождениях был описан новый минерал – клерит, названный в честь учредителя Уральского общества любителей естествознания О. Е. Клера, в изучении которого принимал активное участие Анатолий Филиппович.

В материале из отвалов Дегтярского рудника А. Ф. Бушмакин установил новый минерал – гидрогалид калия и меди, в названии которого (авдонинит) решил увековечить имя известного уральского минералога Владимира Николаевича Авдонина (1925—2017). Утверждение авдонинита ММА как нового минерального вида стало возможным после открытия аналогичной минеральной фазы в продуктах фумарольной деятельности вулкана Толбачик.

В последние годы жизни научные интересы Анатолия Филипповича постепенно смещались в область археологической минералогии.

А.Ф. Бушмакин горячо поддержал учреждение Уральского геологического журнала, вошел в его редакционную коллегию.

Трагическая случайность оборвала жизнь ученого 27 декабря 1999 года... Многие планы оказались нереализованными, но его дело продолжили ученики и коллеги. А. Ф. Бушмакин потратил много сил и времени на подготовку и редакцию книги «Оксиды и гидроксиды», вышедшей в свет уже поле его смерти в 2000 году (первая часть) и 2007 году (вторая часть). В 2002 году в Вестнике Уральского отделения Минералогического общества был издан «Список минералов Меднорудянского месторождения», над которым долгие годы работал Анатолий Филиппович. Всего Анатолием Филипповичем Бушмакиным было опубликовано 115 работ.

Труды А. Ф. Бушмакина о новых минералах

- 1. Чесноков Б. В., Баженова Л. Ф., Каменцев И. Е., Поляков В. О., Бушмакин А. Ф. Свяжинит (Mg, Mn, Ca)(Al, Fe) (SO₄)₂F·14H₂O новый минерал // Записки ВМО. 1984. Ч. 113. Вып. 3. С. 347−351.
- 2. Попова В. И., Попов В. А., Рудашевский Н. С., Главатских С. Ф., Поляков В. О., Бушмакин А. Ф. Набокоит $Cu_{_{7}}$ ТеО $_{_{4}}$ ($SO_{_{4}}$) $_{_{5}}$ · КСІ новые минералы вулканических эксгаляций // Записки ВМО. 1987. Ч. 116. Вып. 3. С. 358–367.
- 3. Чесноков Б. В., Поляков В. О., Бушмакин А. Ф. Баженовит $Ca_8S_5(S_2O_3)(OH)_{12} \cdot 20H_2O$ новый минерал // Записки ВМО. 1987. Ч. 116. Вып. 6. С. 737—743.
- 4. Чесноков Б.В., Баженова Л.Ф., Бушмакин А. Ф. Флюорэллестадит $Ca_{10}[(SO_4),(SiO_4)]6F_2$ новый минерал // Записки ВМО. 1987. Ч. 116. Вып. 6. С. 743—746.

Анатолий Филиппович, Толя... Знал вроде давно, а вот дружба завязалась, когда работали через стенку в подвальчике пристроя 3-го учебного здания. Дня, наверное, не проходило, чтобы не поговорили, не обсудили общие темы, геологические вопросы. Кроме того что он очень часто помогал в рентгеновских определениях, Толя очень основательно помог мне в исследованиях ПИРИТОВ ИЗ ОКОЛОРУДНЫХ МЕтасоматитов Саурейского и Брусничного месторождений на Полярном Урале. При исследовании якутских месторождений золота в углеродистых сланцах им была выявлена **ЗОВИСИМОСТЬ** значений термо-ЭДС от соотношения элементов-примесей в пиритах кобальта, никеля и мышьяка. В тесном контакте мы тогда работали с доцентом кафедры физики А. А. Кривошеиным, которым был разработан и изготовлен оригинальный

прибор для измерения термо-ЭДС и разработана методика для сульфидных минералов. Уже тогда у Толи проявлялся необычайный интерес к минеральным образованиям, которые потом принято было называть техногенными. Вот один из самых обычных для него случаев: в подвальном помещении производился ремонт канализационных труб – меняли стояк, расположенный рядом с рентгеновской лабораторией, а на третьем этаже находилась фотолаборатория института, и понятно, что все отходы производства сливались в канализацию. Когда сантехники стали убирать старые трубы, Анатолий Филиппович попросил их, чтобы вырезали часть труб для исследований минералов. которые образовались на их стенках. Тогда Анатолием Филипповичем были обнаружены необычные химические соединения серебра. Очень интересные исследования по техногенному минералообразованию Анатолий Филиппович проводил уже в Институте минералогии в г. Миассе. Впечатляет его работа по изучению минералов на револьвере, пролежавшем со времен Гражданской войны в почвенном слое. Потом уже Анатолий Филиппович успешно продолжил минералогическую работу над археологическими предметами с известного всем Аркаима. Последний у нас с Толей интерес был к образцам, отобранным мной с отвалов СУМЗа, это псевдоморфозы меди по шамотовому кирпичу и псевдоморфозы гематита по такому же кирпичу из медеплавильной печи. К моему великому сожалению, этой работе не дано было завершиться – Толи не стало.

Валерий Васильевич Григорьев, заведующий отделом полезных ископаемых Уральского геологического музея УГГУ



Уплощенные кристаллы бушмакинита (желтый), ванадиевый вокеленит (темно-коричневый), моттрамит (черный), церуссит (белый, серый), кварц. Березовское золоторудное месторождение, шахта Северная. Размер поля зрения 5 × 8 мм.

- 5. Чесноков Б. В., Лотова Э. В., Павлюченко В. С., Усова Л. В., Бушмакин А. Ф., Нишанбаев Т. П. Святославит $CaAl_{_2}Si_{_2}O_{_8}$ (ромбический) новый минерал // Записки ВМО. 1989. Ч. 118. Вып. 2. С. 111—114.
- 6. Чесноков Б. В., Ковалев Е. Г., Горелов П. Н., Котляров В. А., Бушмакин А. Ф., Жданов В. Ф. Тиннункулит $C_{10}H_{12}N_8O_8$ новый минерал // Минералы и минеральное сырье горно-промышленных районов Урала. Свердловск: УрО АН СССР, 1989. С. 20–24.
- 7. Чесноков Б. В., Лотова Э. В., Нигматулина Е. Н., Павлюченко В. С., Бушмакин А. Ф. Дмиштейнбергит $CaAl_{_2}Si_{_2}O_{_8}$ (гексагональный) новый минерал // Записки ВМО. 1990. Ч. 119. Вып. 5. С. 43–46.
- 8. Мурзин В. В., Бушмакин А. Ф., Суставов С. Г., Щербачев Д. К. Клерит MnSb $_{5}$ новый минерал из Воронцовского золоторудного месторождения (Урал) // Записки ВМО. 1996. Ч. 125. Вып. 3. С. 95–101.
- 9. Бушмакин А. Ф., Вилисов В. А., Котляров В. А. Оксиферберит Fe WO новый техногенный минерал из горелого террикона, Челябинский угольный бассейн // Уральский минералогический сборник. 1998. № 8. С. 23—31.
- 10. Бушмакин А. Ф., Баженова Л. Ф. Авдонинит $K_2CU_5CI_8(OH)_4 \cdot H_2O$ новый минерал из зоны техногенеза уральских колчеданных месторождений // Уральский минералогический сборник. 1998. № 8. С. 32–39.

В честь Анатолия Филипповича Бушмакина назван новый минерал – гидроксил фосфато-ванадата свинца и алюминия, открытый в образцах из зоны окисления Березовского золоторудного месторождения в 1999 году, изученный в 2000–2001 годах, утвержденный Международной минералогической ассоциацией в 2001 году (IMA 2001-031) [2].

Бушмакинит встречен в образце в виде щеточек тонкопластинчатых кристаллов, близких по форме к прямоугольным, размером до 1 × 0,5 × 0,05 мм, имеющим несовершенную огранку: края кристаллов расщеплены, сглажены, закруглены. Своей ярко-желтой окраской бушмакинит обязан одному из основных элементов в своем составе – ванадию.

Минерал хрупок, в иммерсионных препаратах видна спайность по трем направлениям. Бушмакинит оптически двуосный, отрицательный. Показатели преломления Np = 1,99, Nm = 2,03 Ng = 2,06.

Химический состав бушмакинита (масс. %): PbO 65,95; CuO 2,46; ZnO 0,08; Al_O_3 5,75; Fe_O_3 0,05; P_O_5 11,67; V_O_5 9,84; CrO_3 1,99; SO_3 0,10; H_O выч. 1,35. Pb_2,02(Al_0,7,Cu_0,21,Zn_0,01)_0,99[PO_4][(V_0,74,Cr_0,14,P_0,12,S_0,01)_1,01,O_4](OH). Теоретическая формула Pb_(Al,Cu)(PO_)(V,Cr,P)O_(OH).

Бушмакинит — первое природное соединение, в структуре которого достоверно установлено упорядоченное распределение P^{5+} и V^{5+} . Минералы, содержащие фосфат- и ванадат-ионы в сопоставимых количествах, описаны, но структуры их не изучались. В структурном плане минерал относится к группе бракебушита, в структуре представителей которой присутствуют две независимые тетраэдрические позиции, которые в случае с бушмакинитом заполнены фосфором в одной позиции и ванадием в другой. Другим интересным с кристаллохимической точки зрения явлением, обнаруженным в бушмакините, является изоморфная примесь Cu^{2+} в Al-октаэдре. В мире минералов до открытия бушмакинита подобное изоморфное замещение наблюдалось только в осаризаваите. В группе же бракебушита известны как медные, так и алюминиевые минералы, но в них изоморфизма между двумя этими элементами не наблюдалось. Одновременно с вхождением Cu^{2+} в позицию Al^{3+} в бушмакините происходит изоморфное замещение V^{5+} на Cl^{5+} .



Сросток уплощенных кристаллов бушмакинита (желтый), ванадиевого вокеленита (темно-коричневый). Моттрамит (мелкие черные кристаллы) нарастает на бушмакинит. Березовское золоторудное месторождение. Размер сростка 2 × 3 мм.

Бушмакинит (желтые пластинчатые кристаллы), вульфенит (оранжево-желтые крупные кристаллы), пироморфит (зеленый). Пенни Вест Голд Майн (Penny West Gold Mine). Западная Австралия. Образец и фотография Музея Западной Австралии.

Эталонные образцы бушмакинита хранятся в Уральском геологическом музее Уральского государственного горного университета в г. Екатеринбурге и Минералогическом музее им. А. Е. Ферсмана РАН в г. Москве.

Помимо Березовского золоторудного месторождения бушмакинит встречен во Франции, в 2017 году был установлен в ассоциации с вульфенитом и пиромофитом в образце из зоны окисления месторождения Пенни Вест Голд Майн (Penny West Gold Mine) в Западной Австралии. В 2014 году в качестве нового минерального вида ММА был утвержден феррибушмакинит Рb, Fe³⁺(PO,)(VO,)(OH), открытый на месторождении Сильвер Коин Майн (Silver Coin Mine), в Неваде (США).

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Анатолий Филиппович Бушмакин (1947–1999). Некролог. Список научных трудов // Уральский геологический журнал. 2000. № 2(14). С. 195–207.
- 2. Пеков И. В., Клейменов Д. А., Чуканов Н. В., Якубович О. В., Масса В., Белаковский Д. И., Паутов Л. А. Бушмакинит РЬ Al(PO (VO)(OH) новый минерал группы бракебушита из зоны окисления Березовского золоторудного месторождения, Средний Урал // Записки ВМО. 2002. Ч. 131. Вып. 2. С. 62–71.
- 3. Авдонин В. Н., Поленов Ю. А. Очерки об уральских минералах. Екатеринбург: Изд-во УГГГА, 2004. 419 с.
- 4. Уральская школа разведчиков недр: очерки истории / науч. ред. В. А. Душин. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2009. 158 с.
- 5. Клейменов Д. А. и др. Березовское золоторудное месторождение (история и минералогия). Екатеринбург: Уральский рабочий, 2005. 200 с.
- 6. Кривовичев В. Г. Минералогический словарь. СПб.: Изд-во СПб. ун-та, 2008. 556 с.

REFERENCES

- 1. Anatoly F. Bushmakin (1947–1999). In memoriam. 2000, List of academic papers. *Ural'skiy geologicheskiy zhurnal* [Uralian Geological Journal], no. 2 (14), pp. 195–207. (*In Russ*.)
- 2. Pekov I. V., Kleimenov D. A., Chukanov N. V. Yakubovich O. V., Massa, V., Belakovsky D. I., Pautov L. A. 2002, Bushmakinite Pb Al(PO (VO)(OH) a new mineral of the brackeblischite group from the oxidation zone of the Berezovsky gold deposit, Middle Ural. Zapiski Rossiiskogo Mineralogicheskogo Obshchestva [Proceedings of the Russian Mineralogical Society], part 131, Issue 2, pp. 62–71.
- 3. Avdonin V. N., Polenov Yu. A. 2004, Ocherki ob ural skikh mineralakh [Feature stories about the Ural minerals], Ekaterinburg, 419 p.
- 4. Dushin V. A. (ed.) 2009, Ural'skaya shkola razvedchikov nedr: ocherki istorii [Ural School of explorationists of minerals: outlines]. Ekaterinburg, 158 p.
- 5. Kleimenov D. A., Albrecht V. G., Erokhin Yu. V., Batalin A. S., Batalina A. A. 2005, *Berezovskoye zolotorudnoye mestorozhdeniye (istoriya i mineralogiya)* [Berezovskoye gold ore field (history and mineralogy)], Ekaterinburg, 200 p.
- 6. Krivovichev V. G. 2008, Mineralogicheskiy slovar' [Mineralogical dictionary]. Saint Petersburg, 556 p.

Статья поступила в редакцию 15 августа 2018 г.

Геомузейная педагогика – уральская «живинка в деле»: естествоиспытание, эксперимент, научный поиск, самоопределение

Павел Сергеевич КОЗЛОВ^{1,2,*}, Ирина Владимировна КОЗЛОВА^{2,**}, Роман Русланович ЛЕНЦЕВИЧ²

¹Институт геологии и геохимии им. акад. А. Н. Заварицкого УрО РАН, Россия, Екатеринбург ²Центр дополнительного образования, Россия, Свердловская обл., Ревда

Pavel Sergeevich KOZLOV¹, Irina Vladimirovna KOZLOVA², Roman Ruslanovich LENTSEVICH²

¹Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia ²Municipal autonomous institution of additional education "Center for Continuing Education", Geological museum—laboratory, Revda, Sverdlovsk Region, Russia

Geomuseum pedagogy – Ural "creativity in labor of love": natural philosophy, experiment, scientific search, self-determination

Relevance of this work arises from the need to summarize and present to the public the positive pedagogical experience in working with young naturalists and junior geologists, which are fascinated with natural scientific knowledge, interested in searching for and collecting minerals, rocks and fossils, as well as scientific studies and scientific search at the Geological museum cabinet (the status of a "school museum") in UD Revda (Sverdlovsk Region).

This work aims at presenting the foundations of geomuseum pedagogy (GMP) – the authors' pedagogical system of educational and socially practice-oriented activities with junior geologists, young naturalists, to show its advantages compared to the traditional museum pedagogy and the role of the geological museum, integrated geological–ecological–local history expeditions, scientific research and socially important activities in the team development of the junior association "Rifey-GeoEko" and the harmonious development of personality of students.

Research methods. The geomuseum pedagogy is based on the method of systematic pedagogical observations, analysis, and correction of educational activities on the basis of the freedom of choice of natural sciences to study. The naturalist is a nature explorer, which is well informed about nature and how significant the nature to us. The monitoring of the develop-ment of young naturalists is based on person-oriented, team-oriented, and competence-based approaches at studying in the museum, during hiking trips and annual summer expeditions, the participation of juniors in intellectual and creativity competitions and socially-oriented activities.

Research results. Our experience of activity in the field of geomuseum pedagogy (1988–2018) shows the effectiveness of the GMP, which is expressed in the creation of a friendly, purposeful team of like-minded colleagues and, correspondingly, the optimal conditions for the development of personality of each natural scientist. One of the distinguishing features of the GMP is the positive results of the diverse practice-oriented activities of children and junior associations in nature and society. As a result, the authors' principle of the "triple bottom line concept" ("three pillars") of the GMP is implemented: the trinity of personalities in a multilateral activity – children, parents, teachers; the trinity of environments in the education—geological museum, nature, society; the trinity of sciences at the scientific search – geology, ecology, and local history.

Conclusions. The new term – geomuseum pedagogy was proposed for the first time. The essence of this kind of activity is determined by two leading fundamental vectors. The pedagogical vector reflects the results of the supplementary education and a degree of education of children and juniors in the field of natural sciences, as well as their positive choice of the trajectory of life. The second socially important vector demonstrates the results of the practice-oriented activity of a team of like-minded colleagues (children, parents, and teachers), the socialization of young naturalists to help them to get socially involved in the museum, as well as in the nature and society.

Based on the personal experience, authors are strongly convinced that in the Urals and beyond it there are many school geological and geological and local history museums and mineral exhibitions, within which young amateurs of minerals, hiking tours and expeditions. The natural sciences, scientific research, and inquiry encourage children to understanding the evolution of the Earth, develop the natural scientific worldview, and contribute social and professional self-determination, as well as the full development of the human personality. When entering the adulthood, especially in the student years, the acquired knowledge, skills, and life experience will determine the perspectives of their further development.

Keywords: Urals, geomuseum pedagogy, "school" geological museum, junior geologist-naturalist, integrated expedition, students of the museum scientific society "Riphean", metallurgical experiment, socially significant activity, social and professional self-determination, laureates; education and research work, Shilovskoe deposit, "hot paleospots", virtual geological route.

Актуальность работы обусловлена необходимостью краткого обобщения и представления общественности позитивного педагогического опыта работы с детьми-естествоиспытателями, юными геологами при Геологическом музее-кабинете (статус «школьный») ГО Ревда (Свердловская область), увлекающихся естественнонаучными знаниями, интересующихся поиском и коллекционированием минералов, горных пород и окаменелостей, исследованиями и научным поиском. Цель статьи – представить геомузейную педагогику (ГМП) – авторскую педагогическую систему образовательно-развивающей и социально практико-ориентированной деятельности с юными геологами-естествоиспытателями, показать ее отличительные особенности от традиционной музейной педагогики и роль геологического музея, комплексных гео-эко-

^{*}kozlov@igg.uran.ru ^{**}geoeco2012@yandex.ru

лого-краеведческих экспедиций, научного поиска и социально значимой деятельности в развитии коллектива детского объединения «Рифей-ГеоЭко» и личности ребенка.

Методология исследования. В основу положен метод систематических педагогических наблюдений, анализа и коррекции образовательной деятельности на основе свободы выбора детьми естественнонаучной направленности. Естествоиспытатель – тот, кто исследует природу. Мониторинг развития юных естествоиспытателей базируется на личностно-ориентированном, коллективном и компетентностном подходах на занятиях в музее, при проведении походов и ежегодных летних экспедиций, участии детей в интеллектуально-творческих конкурсных мероприятиях и социально направленной деятельности. Результаты исследования. Опыт геомузейно-педагогической деятельности (1988–2018) показывает результативность ГМП, которая выражается в создании дружного целенаправленного коллектива единомышленников и в нем – оптимальных условий для развития личности каждого естествоиспытателя. Одна из отличительных особенностей ГМП состоит в позитивных результатах разнообразной практико-ориентированной деятельности детского объединения в природе и социуме. В процессе реализуется авторский принцип «тройного триединства» – «три кита» ГМП: триединство субъектностей в многогранной деятельности – дети, родители, педагоги; триединство сред в образовании – геомузей, природа, социум; триединство трех наук в научном поиске – геология, экология, краеведение.

Выводы. Впервые введен новый термин – геомузейная педагогика, суть которой определяется двумя ведущими основополагающими векторами. Педагогический вектор отражает результаты дополнительного образования и уровня образованности детей в естественнонаучной направленности, их позитивный выбор жизненного пути. Второй вектор – социально значимый – показывает результаты практико-ориентированной деятельности коллектива единомышленников (детей, родителей, педагогов), социализацию юных естествоиспытателей в музее, природе и социуме. Опираясь на личный опыт, авторы глубоко убеждены, что на Урале и за его пределами существует немало школьных геологических и геолого-краеведческих музеев и выставок камня, при которых идет активная работа с юными любителями камня, устраиваются путешествия, походы и экспедиции. Естествоиспытание, исследования и научный поиск влияют на интерес детей к знаниям естественной истории Земли, естественнонаучное миропонимание, социальное и профессиональное самоопределение, развитие личности. На выходе во взрослую жизнь, особенно в студенчестве, приобретенные знания, навыки и жизненный опыт определяют область их ближайшего развития.

Ключевые слова: Урал, геомузейная педагогика, «школьный» геологический музей, юный геолог-естествоиспытатель, комплексная экспедиция, музейное научное общество учащихся «Рифей», металлургический эксперимент, социально значимая деятельность, социальное и профессиональное самоопределение, учебно-исследовательская работа, Шиловское месторождение, «горячие палеоточки», виртуальный геологический маршрут.

> Геологический музей открыл нам множество дверей в давно ушедшие миры... А. Лукьянов, выпускник музея, кандидат геолого-минералогических наук

> > Мой Урал, Земля золотая! В кладовые я твои стучусь. Буду ли геологом – не знаю, но дерзать и жить я научусь! Девиз юношеского геологического движения на Урале

ы живем на Урале. Понятие «Урал» отражают такие важнейшие категории, как «география», «история», «экономика», «геология», «горы», «граница Европа—Азия». Все эти категории органично закреплены словами фронтового поэта А. Твардовского — «Урал! Опорный край державы, ее добытчик и кузнец...». В мировой литературе образ горнозаводского Урала неразрывно связан с бажовскими сказами и Хозяйкой Медной Горы. Образ ящерки нередко можно увидеть на шевронах формы российских военных. Археологами доказано, что на Среднем Урале еще с доисторических эпох, в палеолите древний человек находил и использовал в быту и охоте нужный камень, а в энеолите проявилась металлургия меди, давшая начало веку бронзы. Около полутора тысячелетий до нашей эры силами рудознатцев и древних металлургов наступил железный век. Минули тысячелетия, и не удивительно, что в наши дни Урал остается одним из крупнейших центров цветной и черной металлургии России. Город Ревда, в котором мы живем, основан А. Демидовым в сентябре 1734 г., когда на Ревдинском чугунолитейном заводе был выплавлен первый чугун. И вполне закономерна находка литейной формы в окрестности города на одной из энеолитических стоянок древнего человека, наталкивающая нас на мысль об истоках древней металлургии, зародившейся около 6 тысяч лет назад.

Точка отсчета

Когда началась перестройка, мы жили и работали геологами в Красноярском крае, на Ангаре. В 1988 г. решили вернуться из Сибири в родные места, в Ревду. Началось с того, что в июне этого же года И. В. Козлова устроилась на работу в Дом пионеров руководителем геологического кружка. Лидия Николаевна Лобова, наш директор, выделила для занятий помещение площадью 60 кв. м на втором этаже. Оно потребовало большого приложения сил и времени, прежде чем стало ребячьим и нашим вторым домом.

Надо сказать, что в эти годы в Свердловской области еще существовало юношеское геологическое движение, возглавляемое Г. Б. Зайцевым. Девиз — «Воспитание геологией!». Осенью 1988 г. было принято решение об организации в Доме пионеров музея, а уже в декабре родился авторский проект «Создание геологического музея-кабинета в г. Ревде», который поддержал городской отдел народного образования. Его тогда возглавлял Петр Михайлович Хакимов. Как руководитель городского отдела народного образования (ГОРОНО) и географ-краевед, любитель природы, он понимал, насколько важно жить на Урале и иметь в городе свой геологический музей-кабинет для естественнонаучного образования детей и помощи педагогам. Нам потребовалось четыре года, чтобы обычная, требующая капитального ремонта комната превратилась в Геологический музей-кабинет.

Чем отличается Ревдинский геологический музей-кабинет от «школьных» геологических музеев Свердловской области? Презентация музея-кабинета общественности города состоялась 18 декабря 1992 г. Ценность и привлекательность любого музея – в его неповторимости и непохожести на другие. Ревдинский включает фундаментальные разделы наук о Земле: геодинамику и учение о полезных ископаемых, минералогию и кристаллографию, петрографию и палеонтологию. Специальная экспозиция посвящена геологии и полезным ископаемым Ревдинского района и юноше-

скому геологическому движению. Как говорится, всего понемногу. На 60 кв. м экспозиционной площади в 20 витринах нижнего научно-информационного уровня размещены около 800 экспонатов: минералы, горные породы, полезные ископаемые Урала и России, окаменелости древней флоры и фауны. Многие из них привезены из экспедиций по Уралу и России, некоторые подарены зарубежными гостями и друзьями музея. Над витринами с каменными экспонатами расположены поясняющие информационные планшеты верхнего научно-информационного уровня. Каменный материал, расположенный в шкафах, служит учебными коллекциями для школьников и юных геологов. Спроектированные внутри витрин зеркала делают музей более просторным, а экспонаты – объемными. Музей – храм науки – удивительный мир камня!

Музей-кабинет имеет статус школьного. Для учителей и учащихся школ всего Ревдинского района он стал большим помощником в проведении обычных уроков, а также уроков-экскурсий, уроков интеграции. Естественнонаучная музейная среда важна не только для получения новых знаний по природоведению, естествознанию и географии. Различные классы минералов позволяют углубить знания детей по химии и физике и даже по литературе, когда изучается творчество уральских писателей П. П. Бажова, Д. Н. Мамина-Сибиряка и др. Окаменелости флоры и фауны важны в изучении биологии, в познании эволюции животных и растений. Горные породы дают детям представление о составе литосферы — каменной оболочке Земли, истории ее образования, о том, как человек использовал камень еще в доисторические времена.

Раритетом музея является коллекция миниатюрных обелисков Европа—Азия, подаренная музею географом-краеведом М. И. Хомутовым (1917—2003). Среди минералов, впервые в мире открытых на Урале, экспонируются вишневит, уваровит, крокоит и др. К раритетам относятся синяя яшма — ирнимит (Приморский край), фрагмент керна вулканической породы, поднятой с глубины около 4 км из Уральской сверхглубокой скважины СГ-4, коллекция кварца — горного хрусталя — из месторождения Додо (Приполярный Урал) и др. В палеонтологической экспозиции особое место занимают окаменелости древней флоры и фауны, впервые найденные клубом в экспедициях по Уралу и исследованные музейным научным обществом учащихся «Рифей» («Геология глазами детей: путь к научному творчеству». Екатеринбург; Ревда, 1999).

Больше всего в музее побывало уральцев. География посетителей обширная: Екатеринбург, Красноуфимск, Серов, Нижние Серги, Пермь ... Москва, Санкт-Петербург, Новосибирск, Псков, Иркутск и др. – более чем из 6о территорий Урала и России. Побывали у нас и иностранцы из США и Израиля, Германии и Австрии, Польши и Словении, Англии и Норвегии, Болгарии и Югославии, из Узбекистана и Казахстана... Ежегодно в различных формах работы музея принимают участие около 2000—2500 человек. Вот некоторые строчки из «Книги отзывов геологического музея-кабинета»: «Музей — чудо нашего города ... Вдохновенный труд...Сокровище... Замечательный... Удивительный ...Поразительный... Потрясающий ... Классный... Здесь творят счастливые люди!» — из отзывов ученых, педагогов, детей и пенсионеров. «Если ты хочешь иметь друзей. Если ты хочешь, чтобы тебе удивлялись и хотели быть похожими на тебя, ты будешь здесь ...», — пишут друзья-студенты нашего музея и клуба. Эти отзывы нас вдохновляют.

А вот как отзываются о музее иностранцы, студенты из США: «...Мы изумлены здешней коллекцией! Надеемся, что сможем сделать подобный образец музея в штате Вайоминг». «Удачи в ваших будущих экспедициях. Мы вернемся и выплавим железо!», — восклицают заехавшие в музей путешественники из Англии, следующие по железнодорожному маршруту через Россию в Сайгон (Вьетнам). Все зарубежные гости удивляются, что на Урале они впервые для себя открыли такие музеи. За рубежом много прекрасных музеев, но музеи со статусом «школьный» и многоликая деятельность при них с участием детей — российский уникум! И мы гордимся этим.

«Образование свободного выбора»

Геологический музей – музей естественной истории – стал прекрасной средой дополнительного образования детей. В «Законе об образовании» говорится, что «образование детей – это обучение, воспитание и развитие». Первая наша авторская программа называлась «Развитие личности детей через геологию как науку». Она стала логическим продолжением работы с детьми в музее после его создания. В ней органично сочетались образовательная, культурнопросветительская, экспедиционная, развитие музейного дела, экспериментальная и другие виды деятельности вне школы с активным участием детей объединения клуб «Рифей».

По определению В. В. Нестерова, экс-министра общего и профессионального образования Свердловской области, побывавшего в нашем музее-кабинете, дополнительное образование — «образование свободного выбора», это свободный выбор учащимся своей экологической ниши, поиск своего детского коллектива для занятия по интересам вне школьных стен. Обращение школьника к нам в музей может быть первым выбором. А возможно, уже вторым или третьим. И не только. Бывает, что дети из неполных семей, а их, к сожалению, становится все больше, испытывают недостаток в родительской заботе, общении. Роль семейной ячейки в таких важных проблемах весьма актуальна.

Для занятий в музее у нас нет специального отбора детей. Одна из наших задач – чтобы клуб «Рифей», объединяя детей значимой деятельностью при музее, стал дружным коллективом единомышленников – детей, родителей, педагогов. Чтобы каждому ребенку в коллективе было тепло и комфортно, чтобы можно было реализовать свои задумки и образовательные потребности по самым разным интересам и запросам, найти друзей, испытать себя в экспедициях и походах, попробовать свои силы в полевых исследованиях, научном поиске в музее-лаборатории, в олимпиадах, конкурсах, минералогических фестивалях ... Некоторые дети приходят к нам в третьем или четвертом классе, кто-то в 7-м, 9-м или даже в 10-м, «прикипают» к клубу и занимаются до окончания школы, до совершеннолетия. Сопровождая детей по жизни, мы создаем им оптимальные условия для жизнетворчества, помогаем сделать личностно значимый позитивный выбор – выбор своего неповторимого жизненного пути.

От музея-кабинета – к музею-лаборатории. Или что нам удалось достичь на научном поприще?

После создания музея-кабинета мы не остановились на достигнутом и продолжили поиск новых возможностей и оптимальных условий для развития детей-естествоиспытателей. Естествоиспытатель, по определению В. И. Даля,

– «...тот, кто исследует явления природы». Через 5 лет нам удалось превратить музей-кабинет в музей-лабораторию и создать при нем музейное научное общество учащихся – МНОУ «Рифей». Тем самым детям были созданы новые дополнительные условия для интеллектуально-творческого развития. Безусловно, самостоятельно заниматься наукой не могут не только дети, но порой и студенты вузов. Но продолжительная совместная поисковая, поисково-исследовательская и последующая многолетняя учебно-исследовательская деятельность естествоиспытателя в МНОУ при поддержке научных руководителей – геологов-наставников-педагогов музея и ученых-консультантов университетов и Академии наук – приносят свои плоды [Козлов, Козлова, 2014 и ссылки в ней].

В 1999 г. нами издан сборник исследовательских работ МНОУ «Геология и экология Урала глазами детей: путь к научному творчеству», где опубликовано 15 статей, в написании которых в том числе принимали участие 12 детей, по геологии, минералогии, палеонтологии, экологии и техногенезу, краеведению и археологии. Некоторые статьи победителей областной геологической олимпиады опубликованы в областном издании Уральской горно-геологической академии «Геология, минералогия и экология Свердловской области» (Екатеринбург, 1999). Сделаны первые шаги к своим пусть маленьким, но открытиям. Впоследствии публиковано более 60 статей и тезисов докладов в материалах научно-практических конференций учащихся в Москве, Обнинске, Санкт-Петербурге, Екатеринбурге, Ревде. Трое воспитанников музея и МНОУ – А. Лукьянов, Е. Крохалев и Э. Шалин – в 1998 и 2003 гг. впервые в истории города Ревды стали лауреатами премии Губернатора Свердловской области на фестивале «Юные интеллектуалы Среднего Урала». Все мы рады, что в 2007 г. Семен Сапурин – воспитанник музея-лаборатории – получил звание лауреата премии Управления образования нашего города и лауреата премии Президента РФ по поддержке талантливой молодежи. Сейчас он заканчивает аспирантуру в Институте геологии и геохимии УрО РАН. Пополнили ряды лауреатов Н. Братанов, ныне студент з курса Уральского педагогического университета, председатель студенческого молодежного клуба Российского географического общества, А С. Десятова – выпускница музея-лаборатории (2000), лауреат Губернаторской премии и Премии Президента РФ, награждена за успехи в освоении профессионального геологического образования в стенах Уральского горного университета. Пусть лауреатов немного, но все они прошли незабываемую школу детскоюношеской геологии. Если некоторые из воспитанников – выпускников музея давно сами стали родителями и вовлечены в профессиональную геологическую, преподавательскую и иные виды деятельности, другие получают высшее образование в вузах или завершают обучение в аспирантуре, или находятся в поиске своей будущей профессии, то пятиклассники делают свои первые шаги в музее, «грызут гранит науки», познавая таинственный мир минералов, пород и окаменелостей в музее, премудрости геологических маршрутов, первых походов и экспедиций.

«Экспедиция – возможность изменить себя к лучшему ...»

Эти слова одного из участников многих экспедиций клуба, выпускника музея говорят о многом. Ведь в самом слове и понятии «экспедиция» заложено глубокое содержание: это и стремление к открытиям, и важная общественно значимая полезная деятельность. Это естествоиспытание и поиск, порой в экстремальных и чрезвычайных природных ситуациях, романтика будней и приключения. А самое важное, ЭКСПЕДИЦИЯ – это коллектив единомышленников.

Именно геомузейная педагогика, в отличие от традиционной «музейной педагогики», через походы и экспедиции за камнем открывает детям пути познания «в давно ушедшие миры». Позади опыт 30 лет экспедиций с детьми по Уралу и России. По нашим наблюдениям, экспедиция как форма весьма привлекательна, востребована и любима детьми, она на многие годы питает детское воображение, расширяет горизонты познания, географический кругозор, дает возможность ответить на поставленные вопросы, проверить себя и дружбу на прочность, пусть пока неосознанно, но сделать вклад в свое будущее [Козлов, Козлова, 2013]. В экспедиции все видно как на ладони. И если говорить об эффективных способах воспитания, то это уникальный способ воспитания социально ориентированного ребенка и коллектива. Комплексные экспедиции музея и клуба — микромодель вхождения детей во взрослую жизнь. Это, по сути, маленькая жизнь: осуществить свою заветную мечту, вместе с друзьями построить палаточный городок, заготовить дрова, разжечь костер, сварить на всех кашу, чтобы она не пригорела. Обустроить быт, организовать интересный досуг и творчество на природе, подружиться, успешно решить поставленные перед экспедицией социально значимые задачи. Все как в настоящей жизни, но только в миниатюре, за 15—20 летних дней и ночей.

Как уже говорилось, экспедиция – общественно полезная, посильная для детей трудовая деятельность. В результате ее в геологическом музее появляются новые экспонаты, учебные и учебно-исследовательские коллекции. Или, к примеру, открытый клубом «Рифей» в природном парке «Оленьи ручьи» (пос. Бажуково) музей под открытым небом «Миткинский рудник» (2007) или построение там же домницы и проведение металлургических экспериментов с выплавлением крицы меди и железа (2018). Но самым главным при всем этом трудовом и интеллектуально-творческом деле участниками-созидателями были и всегда остаются дети – естествоиспытатели, их наставники – педагоги и родители.

От «Железного века» – к экокультуре

Урал – горнозаводской край, «горнозаводская цивилизация», где поиски полезных ископаемых и вовлечение их в металлургическое производство, в металлургию издревле известны. Несомненно, металл позитивно влияет на научно-технический прогресс, жизнь человека, но и его производство вызывает экологические проблемы. И совершенно не случайно, а скорее всего, закономерно, что в 2000 г. при активном инициировании и активном участии нашего клуба состояласьпервая комплексная экспедиция «Железный век» в природном парке «Оленьи ручьи». Социальная цель этих экспедиций – создание экскурсионного объекта под открытым небом в районе Митькинского урочища для развития эколого-просветительской работы парка с посетителями. Для этого понадобились годы и даже проведение ряда металлургических экспериментов по выплавлению крицы железа и меди сыродутным способом в самостоятельно сооруженных клубом нескольких домницах.

Суть металлургических экспериментов (МЭ) заключалась в реконструкции и освоении детьми на практике способов получения металлов древним человеком в эпоху энеолита (медь) и железного века (железо). Важно, что МЭ включает несколько важных этапов: подготовительный – этап жизнеобеспечения экспедиции (заезд, обустройство лагеря

- палаточный городок, питание, быт, поиски и исследования, досуг и др.), теоретико-познавательный, опытно-экспериментальный и методический этапы [Козлов, Козлова, 2018]. Металлургический эксперимент в процессе экспедиции в природе выступает как один из современных внешкольных авторских инновационных методов и методик развития детей – начинающих естествоиспытателей средствами дополнительного образования [Козлов, Козлова, 2013]. Актуальным является конструирование специфической металлургической мини-печи – домницы, технология процесса переплавления руды в крицу и использование элементов занимательной инженерной геологии (поиски и добыча камня для домниц, флюса для плавки на территории эксперимента, использование специального инструмента и приборов и др.). Педагогическая практика показывает, что познание детьми природы и истории через металлургический эксперимент с выплавлением из руд металлов древних эпох (медь, железо) существенно влияет на их социализацию и профессиональное самоопределение. Актуальный, значимый практический результат – совершенствование тематических экспозиций, школьных учебных и учебно-исследовательских коллекций Геологического музея – кабинета Центра, важной музейной среды развития самих участников экспедиции. Не менее важна и передача части экспонатов МЭ в «Демидов-Центр», Ревда (коллекция горных пород и руд) и в Областной музей природы, Екатеринбург (крицы меди и железа; руды; древесный уголь; публикации). Забегая вперед, отметим, что благодаря проведенным ранее экспериментам созданы благоприятные условия для проектирования и построения в 2018 г. части интерактивного металлургического комплекса-домницы в особо охраняемой природной территории СОГУ природный парк «Оленьи ручьи».

В 2005 г. экспедиция клуба «переросла», развилась в экспедицию – школу «Наш выбор-экокультура!». За 8 лет экспедиций юные геологи-экологи-краеведы на практике постепенно знакомились и открывали для себя ряд совершенно новых профессий и понятий: естествоиспытателя и рудознатца – геолога, горняка-старателя и обогатителя, металлурга и ремесленника, отчасти – углежога и кузнеца; экспериментатора и эколога, историка и краеведа и многие другие. Постигая экспедиционную жизнь, мы поняли, какую исключительно важную роль в педагогике сотрудничества играет вхождение детей в разные роли (на своем уровне). «Опыт – вот учитель наш!», — сказал кто-то из великих. Передача инновационного опыта в полевых природных условиях с участием юных геологов-экологов, в полевых конференциях и экспериментах логично подвела нас к экспедиционному мастер-классу. За эти годы участниками интерактивных экспериментов стали свыше боо детей, студентов и взрослых в «Оленьих ручьях», в Ревдинском районе и на озере Иткуль в Челябинской области. И все мы мысленно побывали в эпохах энеолита и железного века. А природный парк в истории особо охраняемых природных территорий стал первой территорией, где вместе – дети и взрослые – в домнице выплавили крицы металлов меди и железа!

Экспедиции в природном парке «Оленьи ручьи» завершились открытием 29 июля 2007 г. природно-исторического музея под открытым небом (МПОН) «Миткинский рудник» [Козлов, 2007 и ссылки в ней]. Проделана большая работа и в составе музея выделены 5 памятников природы и истории: 1. Геологические памятники природы местного значения: а) «Бараний лоб» – геоморфологический природный объект – древняя мезо-кайнозойская специфическая выпуклая (отпрепарированная природой) поверхность выветривания среднедевонских рифогенных известняков, вскрытая карьером при добыче бурого железняка; б) «Водопад» – геолого-палеонтологический объект – омытые водой рифогенные известняки среднего девона с богатой фауной одиночных и колониальных кораллов, брахиопод, криноидей, останков конодонтоносителей и других морских животных Уральского палеоокеана. 2. Историко-горно-геологический памятник регионального значения «Миткинский рудник» отражает добычу бурожелезняковой руды карьерным и подземным (шахтным) способами в середине XIX-начале XX в. 3. Антрополандшафтный памятник природы регионального значения «Миткинские озера» – каскад из трех озер (Верхнее, Центральное и Нижнее), образовавшихся на месте бывших карьеров железных руд, отработанных около 100 лет назад. 4. Геоботанические объекты (на территории выявлено свыше 90 видов растений, из них 2 вида, не характерные для зон техногенеза). 5. Зоологические объекты (характерное местообитание таежных видов животных – лось, волк, рысь, заяц, выдра, норка, бобр и бобровая плотина и др.; филин, глухарь и др.). МПОН «Миткинский рудник» отнесен к историко-горно-геологическому типу. По нашим представлениям, этот объект природного парка чрезвычайно важен для охраны и восстановления природной среды, народных традиций, экологизации сознания самого человека как основного природоизменяющего фактора. Экологически ориентированный туризм и погружение в природу парка гармонируют отношения Человек-Природа для устойчивого развития [Kozlov, 2002].

В 2007 г. в парке побывало около 25 000 человек! «В октябре 2007 г. мы, представители тургруппы «Дикие елки», посетили природный парк «Оленьи ручьи»...Неожиданно вышли к живописному озеру... Аншлаги нам расшифровали все! Это музей под открытым небом Миткинский рудник среди глухой тайги!.. И самое главное – все стоянки, мостики, тропки сделаны руками детей из клуба «Рифей – ГеоЭко», из родной Ревды!.. Следующим летом мы обязательно вернемся на Миткинские рудники и рассмотрим все как следует» (из отзыва туристки И. Е. Логиновских об удивительном маршруте в парке). А сейчас посещаемость парка увеличилась в разы и достигает ежегодно около 100 000 человек!

Работа клуба и всех наших социальных партнеров по достоинству оценена Золотой медалью Первого межрегионального общественного конкурса музеев Западной Сибири и Урала «Музей года. Евразия-2006» в номинации «Люби свой край!», почетными грамотами и дипломами руководства парка, Министерства природных ресурсов Свердловской области, а также оргкомитетами областных экологических программ «Зеленая волна» и «Марш парков». Любить свой край — это нелегкий путь к достижению успешности детей и созданию нового музейного пространства в окружающей среде для устойчивого настоящего и перспективного будущего.

«Живинка в деле»

Геомузейная педагогика – сложившаяся система музейно-педагогической практики – авторское направление в музейной педагогике. Первые результаты роли геомузейной педагогики в развитии личности ребенка опубликованы в 1998 г. Материалы о разных аспектах работы учителей с детьми в естественнонаучном музейном комплексе, в социуме и природе мы опубликовали в методическом пособии «Геологический музей – школа» (2004) и в более чем 40

статьях и тезисах докладов в материалах педагогических научно-практических конференций. В действии наша новая дополнительная общеразвивающая образовательная программа «От естествоиспытания – к выбору пути!» [Козлов, Козлова, 2009 и ссылки в ней]. В 2013 г. успешно завершена работа по 5-летнему грантовому проекту «Естествоиспытание. Научный поиск. Развитие» областной экспериментальной базовой площадки ГАУ ДО «Дворец молодежи», логическим продолжением которого являются новые образовательные инновационные проекты «Геологический музейшкола научного поиска» (2017) и «НаукаЛэнд» (2017).

Приобретая друзей и соратников в педагогической и социально направленной деятельности, мы определили для себя ценностные приоритеты: духовное, нравственное и физическое здоровье, естественнонаучное образование, естествоиспытание, экологическая культура, социальное и профессиональное самоопределение детей — будущих естествоиспытателей. Мы как геологи свой жизненный опыт и «романтическое видение мира» передаем детям. Вместе с ними обогащаем экспонатами наш музей в помощь учителям, совершая походы и экспедиции, оберегаем природные ресурсы, развиваем свою музейную среду обитания. С этими и другими социальными ценностями, с новыми знаниями и приобретенным жизненным опытом в экспедициях и походах рифеевцы — выпускники музея — входят во взрослую жизнь.

Достигнутые успехи состоялись благодаря поддержке многих специалистов и организаций. Пользуясь случаем, выражаем благодарность администрации ЦДО и нашим многолетним социальным партнерам. Музейно-педагогическая деятельность все эти годы тесно связана с Уральским геологическим музеем Уральского государственного горного университета (директор Д. В. Клейменов), с профессором УГГУ, доктором геолого-минералогических наук Ю. А. Поленовым. Значимую роль в реализации интерактивных и исследовательских проектов сыграло межсекторное сотрудничество с привлечением материально-технических ресурсов государственных учреждений, общественных организаций и бизнеса. Благодарим сотрудников СОГУ ООПТ «Природный парк «Оленьи ручьи» (пос. Бажуково, директор Н. М. Калинкин) и Областного «Музея природы» (Екатеринбург, директор Е. С. Скурыхина), сотрудников областных общественных организаций «Центр экологического обучения и информации», Свердловского областного общества охраны природы, «Клуб здоровья «Вита» при УГГУ (Екатеринбург), профкомы и администрации ЗАО «Металлургический холдинг» (г. Ревда, г. Нижние Серги), ООО «Минерал-Шоу» (Екатеринбург), некоммерческий фонд «Достойным – лучшее!» (г. Верхняя Пышма).

«Буду ли геологом?..». Р. Ленцевич: «Я знаю...»

Научный поиск и связанная с ним практико-ориентированная деятельность рассматриваются нами как интересный, увлекательный путь научного познания и жизнетворчества в период детства и юношества. Перевод ребенка из области актуального в область ближайшего развития находит свое логическое и качественно новое продолжение в социальном и профессиональном самоопределении, в выборе своей неповторимой «живинки в деле» в студенческой и взрослой жизни.

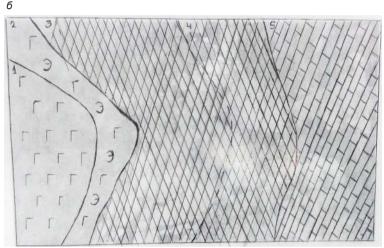
Далее мы представляем в кратком изложении тезисы учебно-исследовательской работы Романа Ленцевича «Маршрут по «горячим палеоточкам» Шиловского месторождения (Свердловская область)» [Ленцевич, 2018]. Роман — одиннадцатиклассник, член МНОУ «Рифей». В 2018 г. он стал победителем областного турнира юных геологов и лауреатом премии Губернатора Свердловской области, участником Второго международного слета юных геологов «ГеоАртек-2018». Его исследовательская работа успешно прошла экспертизу заочного и очного этапов Всероссийской конференции исследовательских работ «Обретенное поколение: наука, творчество, духовность» (Москва, НС "Интеграция") и заслушана в Москве на секции «Геология, минералогия, палеонтология». Роман успешно защитил свою работу и 30 ноября 2018 г. ему вручена золотая медаль федерального конкурса "Обретенное поколение". В интервью газете «Городские вести» на вопрос, кем он хочет стать, Роман ответил: «Профессиональную деятельность свяжу с геологией».

«Введение. В октябре 2017 года наш клуб «Рифей-ГеоЭко» посетил Шиловское медно-скарновое месторождение. Это месторождение заинтересовало меня своей минералогией. А также мне стало интересно, как и при каких температурах образовалось горные породы Шиловского месторождения. Данное месторождение часто посещают. Информацию о месторождении туристы размещают в интернете. Но сайты малодоступны и не всегда понятны обычному кругу путешественников. Цель: Составить виртуальный геологический маршрут по «горячим палеоточкам» Шиловского месторождения. Главные задачи: 1) Отобрать исследовательскую коллекцию горных пород месторождения. 2) Изучить характеристику Шиловского медно-магнетит-скарнового месторождения по литературе и интернету. 3) Изучить информацию по магматическим породам, строению скарнов и температурам их образования. 4) Определить главные группы горных пород по их генезису. 5) Определить «горячие палеоточки» месторождения. 6) Составить для туристов познавательный геологический виртуальный маршрут по «горячим палеоточкам» Шиловского месторождения. Объект исследования: горные породы Шиловского медно-магнетит-скарнового месторождения. Предмет исследования: «Горячие палеоточки» месторождения. Гипотеза исследования: На поверхности Земли можно обнаружить свидетельства-следы «горячих палеоточек», если в глубине Земли в карбонатные породы внедрялась магма различного химического состава и под воздействием ее температуры образовывались скарны, а при ее «охлаждении» кристаллизовались сами магматические горные породы и разные минералы. Методика исследования. Полевая: молоток, лупа, компас и фотоаппарат. Камеральная: микроскоп МБС-2, соляная кислота, шкала твердости минералов Мооса, фарфоровая пластинка. **Палеоточки** – это условно названная нами небольшая область, которая находится в зоне залегания магматических интрузивных и метаморфических горных пород. Месторождение я разделил на пять точек (областей). Месторождение было открыто в 1703 году крестьянином И. Шиловым. Залегает оно в юго-восточном эндоконтакте Верхисетского гранитного массива (http://mineral-show.ru/children/ekskursiya-na-shilovskoe-mednomagnetitskarnovoe-mestorozhdenie). Разрабатывалось с перерывами до 1905 года. В течение этого периода было добыто 480 ооо тонн медной руды [Ярославцев, 1995]. Полезными ископаемыми на месторождении являются медно-магнетитовые руды и золотоносные породы, тела которых залегают в скарнах. Пробность золота 795—806. Палеоточка № 1. Расположена на самой западной окраине карьера (рис. 2). Порода в скальном выступе представлена меланократовым полосчатым габбро. Габбро имеет магматическое происхождение. Температура образования по литературе – около 850 °C (http://referatwork.ru/category/geologiya/view/26943_lekciya_10_skarnovye_mestorozhdeniya). Горная порода габбро состоит из таких минералов, как полевой шпат и пироксены. Через 2–3 м у подножия скального выступа отмечены породы светло-серого цвета, плотные, массивной текстуры, кристаллические. Большая часть породы сложена плагиоклазом, а остальные минералы трудноопределяемы. Мы эту породу называем предварительно эндоскарном, так как она образовалась в краю габбрового тела за счет привноса кальция, углерода и кислорода из мраморов. Температура их образования должна быть, возможно, около 750 °C. Палеоточка № 2. Расположена в западной части карьера, у подножия стенки карьера. Скарнами сложена зона мощностью до 4 м. Породу слагают гранатовые и гранат-эпидотовые, гранат-пироксеновые скарны. То есть данные скарны состоят из такого минерала, как гранат, а также имеет примеси эпидота, пироксена. Также в гранатовых скарнах виден кальцит. Температура образования гранатовых скарнов от 800–400 °C. Вот что ещё хотелось бы заметить: во второй половине данной «горячей палеоточке» были выработаны рудные тела, которые могли вкачать в себя такие элементы, как железо, медь или золото [Мурзин В. В., Сазонов, 1990; Сазонов и др., 1994; Дворник, 2009]. Палеоточка № 3. Точка расположена в центральной части карьера, в восточной стенке карьера. Мраморы и мраморизованные известняки имеют метаморфическое происхождение. Эта порода имеет бурную реакцию с соляной кислотой. Мраморы образовались при температуре около 500 °C. Хотелось бы подме-



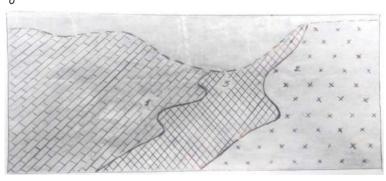
Схематичная геологическая карта Шиловского магнетит-медно-скарнового месторождения с изменениями (представлена Д. В. Ворощуком). Прямоугольниками показано положение геологических разрезов: синий знак – разрез № 1; красный знак – разрез № 2; желтый – разрез № 3. Красные точки означают «горячие палеоточки». 1 – габбро; 2 – скарны-1; 3 – мраморы; 4 – скарны-2; 5 – диориты.





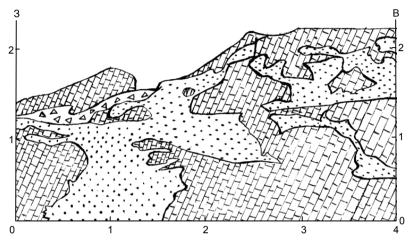
Геологический разрез № 1 через западную часть Шиловского карьера. Контакт габбро (1, 2) с мраморами (7), со скарнами (3, 4, 5, 6). Контакты: а — габбро со скарнами и скарнов с мраморами; арка на границе скарнов и мраморов. б. 1 — габбро измененное с вкрапленностью сульфидов меди и вторичными минералами по ним, 2 — габбро сильно измененное (эндоскарн?), 3, 4 — скарны гранатовые, гранат-эпидотовые, гранат-эпидот-кальцитовые, 5 — мраморы. Звездочки красного цвета — номера образцов (приложение 2, каталог).





Геологический разрез № 2 через восточную часть Шиловского карьера. а – скарны (образцы 10, 11, 12) на контакте диоритов (обр. 13) с мраморами (обр. 9). б – дешифрированный фотоснимок (а): 1 – мраморы, 2 – диориты, 3 – скарн.





Геологический разрез № 3. «Холодная современная точка». Образование кальцитового песка при физическом выветривании мраморов. Точки — современные отложения выветривания: кальцитовый песок, крупнозернистый по мраморам. Треугольники — отвалы скарнов. «Кирпичики» — мраморы. Кривые линии — границы между породами.

тить еще кое-что интересное: в центральной части стенки есть своеобразная «пещера» – выработка длиной несколько метров, получившаяся при добыче руды вкрест мраморов в широтном направлении. В пещере, не доходя до тупика, при освещении фонариком обнаруживается прослой породы (около 1,5 м), напоминающей гнейсы или сланцы. Это метаморфические горные породы, главными минералами которых являются полевые шпаты, кварц и слюды. Палеоточка № 4. Она расположена на восточном борту карьера и располагается между мраморами и диоритами. Данные скарны по виду сильно отличаются от гранатовых, гранат-эпидотовых скарнов своим коричневато-серым цветом, остроугольными краями образцов при скалывании, мелкозернистым строением. Большую часть скарнов составляют плагиоклаз. Контакты скарнов с мраморами и диоритами четкие и резкие. Температура образования этих скарнов примерно 600 °C. Палеоточка № 5. Порода представлена диоритами, состоящими из кварца, плагиоклаза и игольчатого амфибола. В породе местами видны вторичные прожилки эпидота мощностью до 2 см, что говорит о проникновении в диориты растворов, богатых кальцием. Температура образования магмы по литературе около 650—700 °C. Если принять температуру диоритовой магмы 700 °C, то температура образования скарнов, предположительно, была ниже, чем 650 °C. Физическое выветривание пород на поверхности месторождения происходило при атмосферном давлении и температурах, характерных для климата Среднего Урала. Это «холодная современная точка» месторождения.

Я подтвердил гипотезу исследования: на поверхности Земли обнаруживаются свидетельства-следы «горячих палеоточек», существовавших в глубине Земли в девонский период палеозойской эры. В результате исследования разработан виртуальный маршрут по «горячим палеоточкам» Шиловского медно-магнетит-скарнового месторождения. Побывав на месторождении, можно узнать: а) о генезисе главных горных пород: магматическом (габбро и диориты), метаморфическом (мраморы), метасоматическом (скарны) и гидротермальном (медно-магнетитовые и золотые руды); б) о «горячих палеоточках» месторождения (T, °C) – это габбро (850), диориты (700), мраморы (500), скарны (800—400). Таким образом, мы узнаем, что кристаллизующиеся из магмы горные породы и вмещающие их породы имеют разные температуры образования. Хотелось бы подметить еще один факт, что в этом году исполняется 315 лет (!) с года открытия Шиловского месторождения. Практическая значимость моей работы состоит в созданном мною видеоролике «Виртуальная геологическая экскурсия по Шиловскому месторождению» (для туристов, любителей камня), который выложен на Youtube: https://www.youtube.com/watch?v=LQKcfqPtM3U. Результаты работы также докладывались на научно-практических конференциях в г. Екатеринбурге и г. Ревде, на уроках в школе и в нашем геологическом музее, где занимаюсь. В школе весной 2018 г. мной получен зачет по важному для меня экзамену «Проектная деятельность».



Уникальная коллекция миниатюрных обелисков «Европа-Азия» из камня, подаренная географом-краеведом М. И. Хомутовым – раритет геологического музея-кабинета. Фото П. С. Козлова



Р. Ленцевич – юный естествоиспытатель. Фотоархив клуба



В удивительном мире камня. Фото П. С. Козлова



Эксперимент в музее-кабинете. Это чудо — мгновенное образование меди на гвозде в растворе медного купороса и мелантерита из Дегтярского рудника! Фото П. С. Козлова



Железная крица. Металлургический эксперимент. «Оленьи ручьи», 28 октября 2018 г. Фото Е. Русяевой.



Экспедиция удалась! Фото П. С. Козлова



Сооружение клубом «Рифей-ГеоЭко» домницы в ООПТ природном парке «Оленьи ручьи». Июль 2018 г. Фото И. В. Козловой

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Козлов П. С. Об открытии музея под открытым небом «Миткинский рудник» в СОГУ природный парк «Оленьи ручьи (Урал, Свердловская область) // Горные, геологические, палеонтологические, минералогические музеи в XXI веке: материалы науч.-практ. конф. (10–15 сент. 2007 г.). Екатеринбург, 2007. С. 61–62.
- 2. Козлов П. С., Козлова И. В. От естествоиспытания к выбору пути // Дополнительная образовательная общеразвивающая программа образования детей-естествоиспытателей 10–18 лет. Екатеринбург, 2009. 67 с.
- 3. Коэлов П. С., Коэлова И. В. Развитие детей-естествоиспытателей средствами комплексной экспедиции (из опыта геомузейной педагогики) // Современные педагогические технологии в дополнительном геологическом образовании: материалы Всерос. педагог. науч.-практ. конф. СПб., 2013. Стр. 98-107.
- 4. Козлов П. С., Козлова И. В. Музейное научное общество учащихся «Рифей»: естествоиспытание, научный поиск, развитие // Геологическое образование как форма работы ДЮГД по популяризации наук о Земле среди молодежи: материалы Всерос. педагог. науч.-практ. конф. Бахчисарай, 2014. С. 122–129.
- 5. Козлов П. С., Козлова И. В. Металлургический эксперимент в природе интерактивная форма естествоиспытания и познания детьми занимательной инженерной геологии и исторического краеведения // Поиск эффективных форм и методов обучения школьников геологии в камеральный период: материалы Всерос. педагог. науч.-практ. конф. Архангельск, 2018. С. 45–47.
- 6. Ленцевич Р. Р. Маршрут по «горячим палеоточкам» Шиловского месторождения (Свердловская область): учебно-исслед. работа (науч. рук. П. С. Козлов). Рукопись. Ревда, 2018. 32 с.
- 7. Kozlov P. S. Case Stady: Iron Age Progect /GeoEco/ Steosto wards sustainable communities // A Guide for Non Government Organisations. Johannesburg, 2002. P. 24–25.
- 8. Дворник Г. П. Минеральные ассоциации, морфология и состав самородного золота из окисленных руд Шиловского месторождения (Средний Урал) // Под знаком халькофильных элементов. Уральская минералогическая школа-2009: материалы Всерос. науч. конф. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2009. С. 21–23.
- 9. Заридзе Г. М. Петрография магматических и метаморфических пород. М.: Недра, 1980. 424 с.
- 10. Мурзин В. В., Сазонов В. Н. Рудные минеральные ассоциации в Шиловском медно-скарновом месторождении (Средний Урал) // Материалы в минералогии Урала. Свердловск: УрО АН СССР, 1990. С. 69–79.
- 11. Сазонов В. Н., Мурзин В. В., Огородников В. Н., Поленов Ю. А., Григорьев В. В. Шиловское медно-магнетит-скарновое месторождение // Изв. Вузов. Горный журнал. 1994. № 5. С. 154–158.
- 12. Ярославцев Г. В. Геологическое доизучение масштаба 1:50 000 Верхне-Макаровской площади в пределах листов 0-41-109-Г, 0-41-110-В-в,г; 0-41-122-А-а,б; 0-41-121-В; 0-41-121-Г-б,г; 0-41-133-Б-б и общие поиски на площади ГДП и в пределах листов 0-41-121-А-б; 0-41-121-Г-а: отчет Мраморской ГСП за 1989—1994 гг. Екатеринбург, 1995.

REFERENCES

- 1. Kozlov P. S. 2007, *Ob otkrytii muzeya pod otkrytym nebom "Mitkinskii rudnik" v SOGU prirodnyi park «Olen'i ruch'i (Ural, Sverdlovskaya oblast')* [Opening of the Open-Air Museum "Mitkin Mine" in the Sverdlovsk Regional State Educational Institution "Nature Park "Deer Streams" (Sverdlovsk Region, the Middle Urals)]. *Materialy nauchno-prakticheskoi konferentsii "Gornye, geologicheskie, paleontologicheskie, mineralogicheskie muzei v XXI veke"* [Proceedings of research and practical conference "Mining, geological, paleontological, and mineralogical museums in the XXI century", September 10–15, 2007]. Ekaterinburg, pp. 61–62.
- 2. Kozlov P. S., Kozlova I. V. 2009, Ot estestvoispytaniya k vyboru puti [From the natural science to the choice of a way of life]. Dopolnitel'naya obrazovatel'naya obshcherazvivayushchaya programma obrazovaniya detei-estestvoispytatelei 10–18 let [Supplementary general educational program for young naturalists (10–18 years)]. Ekaterinburg, 67 p.
- 3. Kozlov P. S., Kozlova I. V. 2013, Razvitie detei-estestvoispytatelei sredstvami kompleksnoi ekspeditsii (iz opyta geomuzeinoi pedagogiki) [Development of young naturalists by means of the integrated expedition (based on the experience in the field of museum pedagogy)]. Sovremennye pedagogicheskie tekhnologii v dopolnitel'nom geologicheskom obrazovanii [Modern pedagogical technologies in the supplementary geological education]. St. Petersburg, pp. 98–107.
- 4. Kozlov P. S., Kozlova I. V. 2014, Muzeinoe nauchnoe obshchestvo uchashchikhsya "Rifey": estestvoispytanie, nauchnyi poisk, razvitie [Museum scientific society of juniors "Rifey": natural science, scientific search, and development]. Materialy Vserossiiskoi pedagogicheskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Geologicheskoe obrazovanie kak forma raboty DYUGD po populyarizatsii nauk o Zemle sredi molodezhi" [Proceedings of All-Russian pedagogical scientific and practical conference "Geological education as a form of the work of Children and Youth Geological Movement on popularization of Earth Sciences among children and young people]. Bakhchisarai, pp. 122–129.
- 5. Kozlov P. S., Kozlova I. V. 2018, Metallurgicheskii eksperiment v prirode interaktivnaya forma estestvoispytaniya i poznaniya det'mi zanimatel'noi inzhenernoi geologii i istoricheskogo kraevedeniya [Metallurgical experiment in the nature as an interactive form of the natural scientific activity and cognition of recreational engineering geology and local history]. Materialy Vserossiiskoi pedagogicheskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Poisk ehffektivnykh form i metodov obucheniya shkol'nikov geologii v kameral'nyj period" [Proceedings of All–Russian pedagogical scientific and practical conference "Development of effective approaches and methods of teaching school children in Earth Sciences in the office period]. Arkhangelsk, pp. 45–47.
- 6. Lentsevich R. R. 2018, Marshrut po «goryachim paleotochkam» Shilovskogo mestorozhdeniya (Sverdlovskaya oblast'). Uchebno-issledovatel'skaya rabota (nauchn. ruk. P.S. Kozlov) [The route on "hot paleospots" of the Shilovskoe deposit (Sverdlovsk Region, Middle Urals). A research work (adviser P. S. Kozlov)]. Revda [in press].
- 7. Kozlov P. S. 2002, Case Study: Iron Age Project/GeoEco/Steps to world sustainable communities. A Guide for Non-Government Organizations. Johannesburg, pp. 24–25.
- 8. Dvornik G. P. 2009, Mineral'nye assotsiatsii, morfologiya i sostav samorodnogo zolota iz okislennykh rud Shilovskogo mestorozhdeniya (Srednii Ural) [Mineral associations, morphology, and composition of native gold from oxidized ores of the Shilovskoe deposit (Middle Urals)]. Materialy Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii Ural'skaya mineralogicheskaya shkola 2009: Pod znakom khal'kofil'nykh ehlementov" [Materials of All-Russian scientific conference "Ural Mineralogical School–2009: Under the sign of chalcophile elements"]. Ekaterinburg, pp. 21–23.
- 9. Zaridze G. M. 1980, Petrografiya magmaticheskikh i metamorficheskikh porod [Petrography of igneous and metamorphic rocks]. Moscow, 424 p.
- 10. Murzin V. V., Sazonov V. N. 1990, Rudnye mineral'nye assotsiatsii v Shilovskom medno-skarnovom mestorozhdenii (Srednii Ural) [Ore mineral associations at the Shilovskoe copper skarn deposit (Middle Urals)]. Materialy po mineralogii Urala [Materials on the mineralogy of the Urals. Sverdlovsk, pp. 69–79.
- 11. Sazonov V. N., Murzin V. V., Ogorodnikov V. N., Polenov Yu. A., Grigoriev V. V. 1994, Shilovskoe medno-magnetit-skarnovoe mestorozhdenie [Shilovskoe copper–magnetite skarn deposit]. Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal (Ural'skoe gornoe obozrenie) [News of Higher Educational Institutions. Mining Journal (Ural Mining Review)], no. 5, pp. 154–158.
- 12. Yaroslavtsev G. V. 1995, Geologicheskoe doizuchenie masshtaba 1:50 000 Verhne-Makarovskoii ploshchadi v predelakh listov 0-41-109-G, 0-41-110-V-v,g; 0-41-121-A-a,b; 0-41-121-G-b,g; 0-41-123-B-b i obshchie poiski na ploshchadi GDP i v predelakh listov 0-41-121-A-b; 0-41-121-G-a. Otchet Mramorskoij GSP za 1989-1994 gg. [The 1:50 000 geological additional appraisal at the Verkhnee Makarovo area within the sheets 0-41-109-G, 0-41-110-V-v, g; 0-41-122-A-a, b; 0-41-121-V; 0-41-121-G-b, g; 0-41-133-B-b and general prospecting works at the additional appraisal area within sheets 0-41-121-A-b; 0-41-121-G-a. Report of the Mramorskaya geological prospecting party over the period of 1989–1994]. Ekaterinburg.

Статья поступила в редакцию 16 мая 2018 г.

Уважаемые авторы!

Журнал «Известия УГГУ» публикует результаты научных исследований российских и зарубежных авторов на русском или английском языках.

К рассмотрению принимаются рукописи, снабженные следующими необходимыми компонентами.

1. Текст статьи на русском или английском языке (либо двуязычный) в электронном виде. Статьи принимаются на электронную почту редакции: **iuggu-journal@yandex.ru** либо при помощи электронной редакции на сайте iuggu.ru. Не допускается направление в редакцию статей, уже публиковавшихся или посланных на публикацию в другие журналы. Необходимо указывать номер УДК.

2. Аннотация и ключевые слова. Объем аннотации должен составлять 200–250 слов, ключевых слов должно быть не менее 5. По аннотации читатель должен определить, стоит ли обращаться к полному тексту статьи для получения более подробной, интересующей его информации. Стоит воздержаться от второстепенной информации и выражать

мысли возможно более лаконично.

В аннотации должны быть четко прописаны: актуальность, цель работы, метод или методология проведения работы, результаты работы и область их применения; выводы (при необходимости).

Текст статьи должен быть структурирован в соответствии с аннотацией и содержать конкретные разделы: вве-

дение, 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 электрон-

ных переводчиков не рекомендуется.

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 в тексте статьи или в сносках, не вынося в список литературы. Ооязательно 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.

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 е-mail, контактный телефон, номер ORCID ID (аккаунт ORCID обязательно должен содержать информацию о месте работы автора и актуализированный перечень публикаций)

и актуализированный перечень публикаций).

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 ссыл-3. Формулы должны оыть наораны в редакторе мистоѕоп с quanton и пронумерованы, если в тексте имеются скыл-ки на них. При наборе формул и текста латинские буквы выделяют курсивом, а русские, греческие и цифры – прямым шрифтом. Кегль шрифта в формулах должен совпадать с кеглем шрифта основного текста. Тригонометрические знаки (sin, cos, tg, arcsin и т. д.), знаки гиперболических функций (sh, ch, th, cth и т. д.), обозначения химических элементов (Al, Cu, Na и т. д.), некоторые математические термины (lim, In, arg, grad, const и т. д.), числа или критерии (Re – Рейнольдса и т. д.), названия температурных шкал (°С – градусы Цельсия и т. д.) набираются прямым шрифтом. 4. Физические единицы приводятся в системе СИ.

Графический материал Рисунки, карты, чертежи предоставляются в электронно<u>м</u> 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

Исимару А. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. М.: Мир, 1981. 280 с.

Статьи в периодических изданиях Абатурова И. В., Грязнов О. Н. Инженерно-геологические условия месторождений Урала в скальных массивах // Изв. вузов. Горный журнал. 2014. № 6. С. 160–168.

ний высотной конструкции в пределах города Екатеринбурга: автореф. ... дис. канд. геол.-минерал. наук. Екатеринбург: УГГУ, 2013. 24 с.

Сушко А. Е. Разработка специального математического и программного обеспечения для автоматизированной диагностики сложных систем: дис. ... канд. техн. наук. М.: МИФИ, 2007. 170 с.

Зарубежные исследования Hudson J. A. The Scattering of Elastic Waves by Granular Media. Quart Journal Mech. and Applies Math. 1968. Vol. XXI. Pt. 4. pp. 487-502.

Сетевые источники

Биржевой навигатор. URL: http://stock-list.ru/natural-gas.html

Памятка для авторов

Научный журнал не может (и не должен) развиваться только силами редакции. Поэтому, предъявляя новые требования к себе, мы предъявляем их и к авторам, которые хотят публиковаться в нашем журнале.

Требования к оформлению высылаемых рукописей мы публикуем на нашем сайте, а также на последней станице каждого нового выпуска. Здесь мы не будем повторять все это, лишь расскажем о нововведениях, которые нам представляются наиболее важными.

Аннотация. Как на русском, так и на английском языках аннотации сейчас принимаются только расширенные – не менее 200 слов. Делается это для того, чтобы читатель (в том числе иностранный) мог в считанные минуты понять, о чем данная статья и представляет ли она для него интерес.

Список литературы. К сожалению, публикации в советских журналах традиционно отличались от иностранных меньшим числом источников. Кроме того, отечественные ученые зачастую не утруждают себя изучением иностранных публикаций на интересующую тему. Также часты использования в качестве источников различных учебников, методичек и пр. Все это значительно снижает уровень публикаций. Поэтому мы взяли за правило рекомендовать авторам расширять список литературы до 10–15 источников с обязательным использованием современных зарубежных публикаций. Исключения возможны, но они должны быть обоснованными.

DOI. Помимо ставшего уже привычным для авторов присваиваемого каждой статье номера УДК, начиная со второго номера 2016 года каждой статье в обязательном порядке присваивается номер DOI.

DOI (*англ*. Digital object identifier) – классификатор цифрового объекта для создания постоянных гиперссылок, которые позволяют сохранять информацию о конкретной статье в сети Интернет, даже если изменилась структура сайта, где эта статья изначально была сохранена.

Проще говоря, номер DOI позволяет научной статье гарантированно открываться и быть доступной для поиска в сети, что совершенно необходимо для того, чтобы статья могла цитироваться с помощью Интернета, не затрудняя авторов поисками ее в библиотеках и архивах – своего рода дань современным IT-технологиям.

Редакцией «Известий УГГУ» заключен договор с Некоммерческим партнерством «Национальный Электронно-Информационный консорциум» (НП НЭИКОН), которое предоставляет в России посреднические услуги по присвоению DOI от регистрационного агентства (DOI Registration Agency) CrossRef. Это самый современный центр регистрации Международной организации документации, основной задачей которого является организация доступа пользователей к первичным публикациям, содержащим научный контент, и содействие коллективной работе издателей по всему миру. Эту кооперативную справочную систему сейчас используют большинство научных журналов в мире.

DOI обязательно указывается при цитировании статьи. В журнале «Известия УГГУ» DOI сейчас присваивается каждой вновь вышедшей статье. Также номер DOI может быть присвоен любой из статей, которые ранее публиковались в нашем журнале – но уже не в обязательном порядке, а по желанию авторов. Для желающих достаточно сделать заявку в редакцию.

Качество перевода. Нас не устраивает перевод аннотаций (и уж тем более – статей) с помощью электронных переводчиков. Если вы не уверены в своем переводе, лучше обратитесь за помощью в редакцию. Лучше не предоставить никакого перевода, чем перевод низкого качества.

Качество рисунков. Рисунок должен оставаться качественным при увеличении. Не забывайте о том, что статья будет опубликована не только в бумажной, но и в электронной версии.

Качество текстов. При рассмотрении рукописи авторитет и заслуги автора статьи во внимание не принимаются – только качество присланного текста. Для этого введено двойное слепое рецензирование.

Слепое рецензирование. Два рецензента оценивают качество статьи, не зная, кто ее автор. В случае, если рецензент узнает автора, то рукопись автоматически передается другому рецензенту – из числа экспертов, сотрудничающих с журналом. Делается это для того, чтобы личные отношения не влияли на качество рецензии. Автор также не знает своего рецензента.

Помимо этого, правила публикации текстов предполагают их разнообразие. Поэтому **недопустима публикация двух статей одного автора в одном номере журнала.** То же правило распространяется и на соседние номера. Так мы поддерживаем разнообразие тем и авторов, исключая превращение журнала в издание, где постоянно публикуется десяток одних и тех же авторов. Исключение составляют статьи вне научных разделов, а также статьи, продолжающиеся из номера в номер. В качестве альтернативы публикации в нашем журнале мы можем предложить автору опубликоваться в другом журнале, с которым у нас заключен договор по обмену статьями.

Очередь. Сроки публикации зависят от количества (и качества) статей, предложенных редакции. Если статей много, они публикуются в порядке очередности, однако редакция оставляет за собой право печатать вне очереди те из них, которые считает наиболее значимыми.

Автор должен также подписать согласие на использование редакцией журнала "Известия УГГУ" его персональных данных.

На обложке: фото бушмакинита – минерала, открытого в образцах из зоны окисления Березовского золоторудного месторождения в 1999 году.

On the cover: the photo of Bushmakinite, the mineral found in samples from the Berezovsky ore deposit oxide zone in 1999.

Редакция выражает благодарность за помощь в работе журнала

Баранникову Александру Григорьевичу – д-ру геол.-минерал. наук, профессору (Екатеринбург, Россия), Боярских Геннадию Алексеевичу – д-ру техн. наук, профессору (Екатеринбург, Россия); Гордееву Виктору Александровичу – д-ру техн. наук, профессору (Екатеринбург, Россия); Карстен Луизе – Dr. rer. nat. (Ганновер, Германия); Кожушко Герману Георгиевичу – д-ру техн. наук, профессору (Екатеринбург, Россия); Козину Владимиру Зиновьевичу – д-ру техн. наук, профессору (Екатеринбург, Россия); Корнилкову Сергею Викторовичу – д-ру техн. наук, профессору (Екатеринбург, Россия); Сурневу Виктору Борисовичу – д-ру физ.-мат. наук, профессору (Екатеринбург, Россия); Тимухину Сергею Андреевичу – д-ру техн. наук, профессору (Екатеринбург, Россия); Филиппову Сергею – Dr. rer. nat. (Ганновер, Германия); Хальфину Марату Нурмухамедовичу – д-ру техн. наук, профессору (Новочеркасск, Россия)

Заместитель главного редактора Шорин А. Г. Ответственный секретарь Шорина Э. В. Редактор Фишман Ю. П. Переводчик Алферова А. М.

Верстка Шориной Э. В. Корректура Пихтовниковой О. Г. Идея обложки Васфиловой И. С.

Подписано в печать 3.12.2018. Формат $60 \times 84/8$. Печать офсетная. Усл. печ. л. 19,99. Тираж 500. Заказ № 16. Цена свободная

Почтовый адрес редакции: 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30, Уральский государственный горный университет, к. 3142. Тел.: (343)251-15-95 E-mail: iuggu-journal@yandex.ru https://iuggu.ru

Отпечатано в типографии ООО "Ковчег" 394033, г. Воронеж, пр-т Ленинский, д. 119a, оф. 226